

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE FORNOS INTERMITENTES TIPO  
“PAULISTINHA” UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**WAGNER MITIO KAWAGUTI**

**Florianópolis, novembro de 2004.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM FORNO INTERMITENTE TIPO  
“PAULISTINHA” UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**

**WAGNER MITIO KAWAGUTI**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**

**sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Vicente de Paulo Nicolau, Dr. - Orientador**

---

**José A. Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Edson Bazzo, Dr. - Presidente**

---

**Antonio Carlos Ribeiro Nogueira, Dr.**

---

**Dachamir Hotza, Dr.**

Ao meu pai, Suuzi Kawaguti.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe Sahdia, que à sua maneira, pelo seu apoio incondicional em todas as decisões da minha vida. Aos meus irmãos Fernando, no qual me espelho e Bruno, por quem me esforço para servir de exemplo.

Ao meu orientador, professor Vicente de Paulo Nicolau, pelo apoio técnico, com quem aprendi muito sobre radiação, medição experimental, e principalmente a desenvolver um trabalho de pesquisa. Também agradeço pela sua total disponibilidade, tanto no que diz respeito ao trabalho, quanto às questões pessoais, sempre paciente e prestativo.

Aos professores Edson Bazzo e Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior que despenderam várias vezes “alguns minutos”, para esclarecer dúvidas recorrentes ao trabalho, e transmitir seus conhecimentos e suas experiências.

Aos professores Edson Bazzo, Antonio Carlos Ribeiro Nogueira e Dachamir Hotza, por comporem a banca examinadora e contribuírem tecnicamente na conclusão deste trabalho.

Aos meus companheiros do grupo de cerâmica vermelha: Willian, dando importantes conselhos e me convencendo da importância do curso; Tales, sendo fundamental nas difíceis aquisições de dados; Rafael “Elemento”, sendo muito competente em simulações numéricas; Alessandro, passando sua experiência no setor cerâmico; Lúcio, com sua experiência no CFX; e Rodolfo que muito me ajudou no desenvolvimento do programa, nas simulações e na preparação de gráficos. Mas agradeço a eles principalmente pelo companheirismo dedicado nos anos que passamos juntos.

Aos meus amigos do LabCET, Cláudio, Zacka, Fernando, Eduardo, Heitor, Rafaela, Matelli, Luciano, Márcio, Simone, Flávia, Newton, Catapan, “Salsicha”, Leonel, Renzo e Wilian, e do Labtermo, Edevaldo.

À todos os meus amigos espalhados pelo mundo, em especial ao Gustavo “Nariga”, ao Alessandro “Gaúcho”, ao Daniel “Cabeça” e ao Rafael “Cebola”, que desde o meu primeiro dia na universidade fazem parte do meu dia-a-dia.

À Cerâmica Solar, que, graças ao seu pioneirismo, permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

À RedegásEnergia, formadas pela SCGÁS, TBG e Petrobrás, pelo apoio financeiro, viabilizando o desfecho deste trabalho.

À ANP pelo apoio financeiro com o pagamento de 2 anos de bolsa, permitindo a minha total dedicação neste trabalho.

## SUMÁRIO

SUMÁRIO .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	IX
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Apresentação .....	1
1.2 Histórico .....	3
1.3 Panorama da indústria de cerâmica vermelha no Brasil .....	5
1.4 Panorama da indústria de cerâmica vermelha em Santa Catarina .....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Argila .....	8
2.2 Cerâmica .....	8
2.3 Processo produtivo .....	9
2.4 Combustíveis utilizados.....	14
2.5 Uso do gás natural .....	15
2.6 Fornos intermitentes .....	16
2.7 Processo de queima .....	16
2.8 Curva de queima .....	17
2.9 Modelagem de fornos cerâmicos .....	20
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	23
3.1 Descrição Técnica do Forno Estudado .....	23
3.2 Aquisição de Dados Experimentais.....	28
4. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	34
4.1 Balanço de energia .....	36
4.2 Balanço global de energia.....	41
4.3 Programa de simulação .....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	48
5.1 Resultados experimentais preliminares .....	48
5.2 Resultados de simulação numérica .....	51

5.3 Isolamento do forno .....	52
5.4 Simulação do forno utilizando o gás natural.....	56
5.5 Resultados experimentais utilizando o sistema de gás natural .....	57
5.6 Reações presentes no processo.....	61
5.7 Simulação assistida por CFD .....	67
5.8 CFX-5.....	67
5.9 Passo de tempo .....	69
5.10 Domínio de solução .....	71
5.11 Modelagem do meio poroso.....	71
5.12 Malha .....	73
5.13 Condição de contorno .....	73
5.14 Condições de contorno da simulação da “fatia” do forno .....	75
5.15 Novo domínio de solução.....	76
5.16 Malha .....	77
5.17 Condição de contorno .....	77
5.18 Resultados assistido por CFD.....	78
6. CONCLUSÕES .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha. ....	10
Figura 2 – Lotes de argila em sazonalidade .....	11
Figura 3 – Caixa alimentador .....	11
Figura 4 – Misturador .....	11
Figura 5 – Laminador .....	12
Figura 6 – Extrusora.....	12
Figura 7 – Secagem natural. ....	13
Figura 8 – Secagem em estufa. ....	13
Figura 9 – Consumo de combustível em fornos em Santa Catarina. ....	14
Figura 10 – Curva típica de queima de produtos cerâmicos. ....	17
Figura 11 – Efeito causado pela água residual na curva de queima.....	18
Figura 12 – Efeito causado pelo material orgânico presente nas peças na curva de queima. ....	19
Figura 13 – Curva de queima típica característica para preservar o material dos danos causados pela transformação do quartzo.....	19
Figura 14 – Variação da curva de queima para diferentes tamanhos de produto. ....	20
Figura 15 – Cerâmica Solar. ....	23
Figura 16 – Desenho esquemático do fluxo de gases no interior do forno. ....	24
Figura 17 – Fornalha aberta com queimador a óleo. ....	25
Figura 18 – Crivo do forno. ....	25
Figura 19 – Operador retirando uma amostra .....	27
Figura 20 – Controle de qualidade. ....	27
Figura 21 – Queimador à óleo.....	27
Figura 22 – Queimador à gás natural.....	27
Figura 23 – Desenho do forno com o posicionamento dos termopares. ....	28
Figura 24 – Termopares posicionados na abóbada do forno.....	29
Figura 25 – Sistema de aquisição de dados. ....	29
Figura 26 – Visão geral da ERPM.....	30
Figura 27 – Medição do consumo de GN.....	30
Figura 28 – DTA e TG para a argila AF01. ....	32
Figura 29 – DTA e TG para a argila AC73. ....	33
Figura 30 – Discretização do problema.....	35
Figura 31 – Elemento de volume da carga utilizado no processo de discretização. .	38

Figura 32 – Fluxograma do programa de simulação.....	46
Figura 33 – Variação de temperatura ao longo do tempo em alguns pontos do forno	48
Figura 34 – Indicação dos pontos analisados.	49
Figura 35 – Comparação entre as temperaturas medidas e teóricas para o piso e a abóbada. ....	51
Figura 36 – Destinação da energia utilizada na queima segundo a simulação.....	52
Figura 37 – Comparação entre as temperaturas teóricas do piso e da abóbada do forno, com e sem isolamento da abóbada. ....	54
Figura 38 – Destinação da energia utilizada na queima segundo a simulação.....	55
Figura 39 – Curvas de queima teóricas do piso e da abóbada. ....	56
Figura 40– Comparação entre as temperaturas medidas e teóricas para o piso e a abóbada, simulação sem as reações. ....	59
Figura 41 – Comparação entre as temperaturas medidas e teóricas para o piso e a abóbada, simulação com as reações.....	61
Figura 42 – Curva programada e medida durante a 2ª medição.....	63
Figura 43 – Curva programada e medida durante a 3ª medição.....	64
Figura 44 – Curvas de queima obtidas com óleo e GN, no teto do forno.....	65
Figura 45 – Representação do domínio e subdomínios de solução.....	71
Figura 46 – Empilhamento da carga. ....	73
Figura 47 – Distribuição de pressão nos dois planos utilizados para o cálculo da razão. ....	74
Figura 48 – Domínio de solução do problema completo. ....	76
Figura 49 – Domínio de solução do problema completo – com a representação dos subdomínios.....	77
Figura 50 – Campo de temperatura. ....	78
Figura 51 – Campo de velocidades.....	79
Figura 52 – Vetores de velocidade projetados no plano xz que passa pelo centro do forno.....	80
Figura 53 – Esquema ilustrativo para interligação dos fornos Cerâmica Solar. ....	83



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de temperatura de reações. ....	17
Tabela 2 – Elementos do programa de simulação, número de equações e de pontos de discretização. ....	36
Tabela 3 – Composição química das amostras de argila.....	31
Tabela 4 – Classificação das lajotas produzidas utilizando óleo BPF.....	50
Tabela 5 – Consumo energético do forno estudado utilizando óleo BPF.....	50
Tabela 6 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima. ....	53
Tabela 7 – Propriedades da cinza de casca de arroz – amostras de 10 x 10 cm. ....	53
Tabela 8 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima, com o forno isolado na abóbada, usando lenha e óleo BPF.....	55
Tabela 9 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima, com o forno isolado, utilizando GN. ....	57
Tabela 10 – Composição química dos gases medida durante a regulação do sistema de queima do gás natural. ....	59
Tabela 11 – Classificação das lajotas produzidas utilizando GN na 1ª medição. ....	60
Tabela 12 – Consumo energético do forno estudado utilizando GN na 1ª medição. ....	60
Tabela 13 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima, com o forno isolado, com gás natural e considerando as reações na carga. ....	62
Tabela 14 – Classificação das lajotas produzidas utilizando GN na 2ª medição. ....	63
Tabela 15 – Consumo energético do forno estudado utilizando GN na 2ª medição. ....	63
Tabela 16 – Classificação das lajotas produzidas utilizando GN na 3ª medição. ....	64
Tabela 17 – Consumo energético do forno estudado utilizando GN na 3ª medição. ....	65
Tabela 18 – Eficiência energética/ganho específico por fornada, com óleo BPF ou GN.....	66
Tabela 19 – Eficiência energética, com óleo BPF ou GN. ....	66
Tabela 20 – Retorno financeiro, com óleo BPF ou GN. ....	66

## SIMBOLOGIA

$A_{sup}$ :	área da superfície de troca de calor;
$c_p$ :	calor específico;
$\dot{E}$	energia gerada ou consumida por unidade de volume;
$F_{gas}$	Função de distribuição do fluxo de gases no interior da carga;
$g$ :	Aceleração gravitacional
$h$ :	entalpia específica;
$h_c$ :	coeficiente de troca de calor por convecção;
$k$ :	condutividade térmica do material;
$m$	massa do elemento em consideração;
$n_{erc}$	número de elementos radiais da carga;
$PCI$ :	poder calorífico inferior;
$q''_k$ :	fluxo de calor condutivo por unidade de área;
$q''_c$ :	fluxo de calor convectivo por unidade de área;
$q''_r$ :	fluxo de calor radiativo por unidade de área;
$Q$	ganho de energia pelo elemento considerado - balanço geral;
$R_0$ :	constante universal dos gases;
$s_c$ :	altura do elemento da carga;
$S_M$ :	termo fonte;
$T$ :	temperatura;
$T_c$ :	temperatura do elemento da carga;
$T_{ps}$ :	temperatura do elemento do piso superior;
$T_{pi}$ :	temperatura do elemento do piso inferior;
$T_{Pin}$ :	temperatura do elemento da parede interior;
$T_{Pmi}$ :	temperatura do elemento da parede média interior;
$T_{Pme}$ :	temperatura do elemento da parede média exterior;
$T_{Pex}$ :	temperatura do elemento da parede exterior;
$T_{Ai}$ :	temperatura do elemento da abóbada interior;
$T_{Am}$ :	temperatura do elemento da abóbada média;
$T_{Ae}$ :	temperatura do elemento da abóbada exterior;
$T_{Gf}$ :	temperatura do elemento dos gases do forno;
$T_{Gp}$ :	temperatura do elemento dos gases do piso;
$\vec{u}$ :	vetor velocidade;
$V$ :	volume;

$\beta$ :	coeficiente de expansão térmica do fluido;
$\varepsilon$ :	emissividade superficial;
$\rho$ :	massa específica;
$\sigma$ :	constante de Stefan-Boltzmann;
$w$ :	peso molecular;
$\Delta t$ :	passo de tempo;
$\nabla T$ :	gradiente de temperatura;
$\nabla \vec{u}$ :	gradiente de velocidade;
$\frac{\partial T}{\partial t}$ :	variação da temperatura em função do tempo;

## RESUMO

A indústria de cerâmica vermelha possui grande representatividade na indústria de Santa Catarina, sendo responsável pela geração de um grande número de empregos. Entretanto, a falta de investimento tanto por parte do governo, quanto por parte dos empresários, estagnaram o desenvolvimento deste setor, que hoje se encontra cerca de 50 anos defasados em relação a países como Itália e Espanha. Devido a sua natureza, que necessita de calor para transformação do material, este setor apresenta grande dispêndio de energia térmica, proveniente da queima de materiais orgânicos. Atualmente a queima de produtos cerâmicos é realizada de forma contínua, semi-contínua ou intermitente. A eficiência obtida com os fornos intermitentes é muito baixa, consumindo em certos casos, cinco vezes mais energia do que os modernos fornos túneis. Apesar de sua baixa eficiência, os fornos intermitentes são encontrados com maior frequência nas empresas de Santa Catarina. Porém a substituição dos fornos deverá ser feita ao longo do tempo, pelo alto custo dos fornos contínuos. Buscando melhor avaliar o comportamento dos fornos intermitentes durante o processo de queima, foram realizadas simulações numéricas utilizando um programa em linguagem Fortran (*Simfint*), desenvolvido durante o trabalho de conversão do forno, identificando as perdas presentes no processo. Para avaliar o comportamentos dos gases presentes no interior do forno foi utilizado o pacote computacional *CFX 5*, que utiliza ferramentas de CFD, fornecendo os campos de pressão e de velocidade no interior do forno. Tais dados foram comprovados experimentalmente a partir de um forno modelo já convertido ao gás natural. Ao *Simfint*, foram incluídas as equações referentes às perdas causadas pelas reações sofridas pelo material durante seu aquecimento e queima, assim modelando com maior fidelidade o fenômeno estudado. Com essas ferramentas, foram identificados os mecanismos de perdas de energia e possíveis melhorias do processo, apresentando uma alternativa viável para minimizar os problemas decorrentes do elevado consumo de energia.

*Palavras-chave: Processo de Queima; Cerâmica Vermelha; Simulação Computacional, Forno Intermitente.*

## ABSTRACT

The ceramic industry has great importance in the Santa Catarina industry, being responsible for a great number of jobs. However, the lack of investment by the government, and also by the businessman, has stagnated the sector development, which today is at about 50 years behind countries like Italy and Spain. Due to its nature, which demands heat for the material transformation, this sector has great thermal energy consumption, from the combustion of organic materials. Nowadays exists two different ways to produce ceramic materials; continuously or intermittently. The efficiency obtained using intermittent kilns is very low, taking in some cases even five times more energy in comparison to modern continuous kilns. Although less efficient, intermittent kilns are frequently found in the industries of Santa Catarina. But the simple substitution of the kiln is not feasible in short term, because of the great cost of continuous kilns. Searching to better know the behavior of the burning process in the intermittent kiln, numerical simulations were made using a Fortran language program (Simfint), developed during conversion work in the kiln, identifying the heat losses present in the process. For the solution of the fluid mechanics problem present was used the computational package CFX 5, which uses CFD tools, calculation the pressure and velocity fields inside the kiln. These data were experimentally proved through a kiln already converted to natural gas. To Simfint were added the equations referring to the heat losses in the material caused by the reactions during firing and heating up, thus modeling more faithfully the phenomenon. With these tools were identified the mechanisms of heat losses and possible improvements for the process, presenting a feasible alternative to minimize the problems of high energy consumption.

*Keywords: Burning Process; Structural Ceramic; Computational Simulation, Intermittent Kiln.*

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Apresentação**

A cerâmica vermelha, classe à qual pertence o tijolo usado em nossas casas, em nossos muros, enfim na maioria das estruturas edificadas pelo homem, nos acompanha desde tempos remotos. Segundo Resende (2001), Platão diz que a cerâmica deve ter sido a primeira das artes conhecidas. O tijolo e as olarias foram um marco na história da civilização. A cerâmica apresenta uma resistência quase igual a da pedra, resistindo às forças do intemperismo e aos efeitos da poluição, sendo mais resistente que o mármore que é atacado pela chuva ácida, mas que ainda persiste diante dos padrões de estética. As olarias, fornecedoras tradicionais deste produto, especialmente no Brasil, parecem por vezes serem mais velhas que o próprio tijolo. Com ares antiquados, rudimentares, destoam em meio ao quadro de desenvolvimento tecnológico do século XXI.

Apesar de um pouco esquecida, ainda hoje a indústria cerâmica tem um papel importante no desenvolvimento da humanidade, pois está presente na grande maioria das construções que crescem na mesma proporção que o mundo se desenvolve. Em países como Itália e Espanha, este setor tem acompanhado o crescimento tecnológico dos tempos modernos. Porém no Brasil, devido à abundância de matéria prima, ao perfil do empresário e a falta de incentivo do governo, a indústria de cerâmica estrutural encontra-se estagnada, com um atraso de mais de 50 anos quando comparada aos países acima citados. Este cenário faz com que fornos intermitentes, que apesar de sua eficiência estar muito aquém dos fornos contínuos, sobrevivam e ainda sejam maioria nas olarias brasileiras.

O processo de fabricação da cerâmica consiste no aquecimento da argila, provocando transformações na estrutura do componente, conferindo-lhe resistência. Desta forma, tal processo demanda muita energia térmica para sua execução. No processo de secagem e queima, o principal combustível usado tem sido a lenha e seus derivados, destacando-se a serragem. Também tem sido utilizados o óleo combustível (BPF) e o carvão mineral, em menor escala.

As indústrias mais desenvolvidas, por fabricarem produtos de alto valor agregado – como os produtos esmaltados – necessitam de um combustível “limpo”. Este fato justifica o uso de gás natural ou mesmo GLP nestas indústrias.

Com a chegada do gás natural na região sul do Brasil, através do gasoduto Bolívia-Brasil, viu-se a possibilidade do desenvolvimento da indústria de cerâmica vermelha no Estado de Santa Catarina. Sabe-se que, neste setor da indústria, o gás natural é usado em grande escala nos países desenvolvidos, enquanto no Brasil seu uso ainda está em fase experimental. A utilização do gás natural é uma tendência mundial, por ser um combustível

mais nobre, menos poluente e em estado gasoso, facilitando o controle de sua queima. No Brasil, o uso de lenha e seus derivados como combustível na indústria de cerâmica vermelha ainda é preponderante, face aos custos quando comparados ao gás natural. Apesar das suas vantagens como combustível, o gás natural não tem penetração imediata no setor, primeiro em razão dos custos e segundo pelo desenvolvimento tecnológico alcançado pelo setor. A tecnologia atual não é adequada para atingir o nível de produtos de maior valor agregado, que necessitem um combustível nobre, ou que compense um maior investimento, tanto em equipamentos quanto em combustível. Sendo renováveis, a madeira ou a lenha, encontram-se no centro de uma discussão, cujas componentes não estão completamente definidas. Não se tem uma avaliação precisa das áreas plantadas e de disponibilidade em curto e médio prazo, assim como não se tem uma avaliação precisa de quem são ou serão os seus consumidores, e de quais serão os volumes a serem consumidos. Além disso, barreiras foram impostas pela legislação ambiental, no que diz respeito às madeiras nativas. Já no caso dos resíduos de madeira, uma ameaça ainda encontra-se no seu uso para a geração de energia elétrica, bem como a utilização destes resíduos na fabricação de produtos para a indústria moveleira, como é o caso dos aglomerados.

Neste contexto, é muito importante a realização de um estudo do comportamento térmico de fornos intermitente tipo “paulistinha”, frente à conversão para o uso de combustíveis mais nobres como o gás natural, de modo que se possa analisar a viabilidade deste processo de substituição. A escolha deste forno se deve à disponibilidade da empresa interessada em participar deste projeto.

Este trabalho consiste no aprimoramento de um modelo matemático desenvolvido em linguagem Fortran, denominado *SimFint*, apresentado por Nicolau et al. (2002a), utilizado nas simulações do comportamento térmico de um forno intermitente. Paralelamente a esta atividade, foram realizadas simulações utilizando o software comercial CFX 5.6, de maneira a comparar os resultados de ambos os programas com dados experimentais obtidos em campo. Deste modo tem-se como objetivo final a obtenção de melhorias a serem implementadas no processo final de secagem e no processo de queima visando um aumento da qualidade dos produtos, bem como uma redução no consumo de combustível.

Com o uso do *SimFint* será possível determinar os principais mecanismos de perda, os gradientes de temperatura, bem como prever o consumo de combustível e sua adaptação ao uso do gás natural.

Para determinação do campo de pressão e velocidade será utilizado CFX. Como a movimentação dos gases é predeterminada no programa *SimFint*, o resultado apresentado pelo CFX será utilizado para adequar o modelo desenvolvido em volumes finitos, representando de forma mais fiel o fenômeno de escoamento dos fluidos.

Os resultados obtidos matematicamente serão comparados aos resultados medidos experimentalmente, buscando sua validação. A comparação será feita através de valores de temperatura, medidos em diversos pontos do forno, ao longo de todo processo de aquecimento e queima.

Esta análise indicará alternativas viáveis de melhorias no processo de fabricação de produtos cerâmicos em fornos intermitentes tipo “paulistinha”, bem como sua adaptação ao uso de outros combustíveis.

Este trabalho dará continuidade ao projeto de conversão de fornos cerâmicos ao gás natural realizado anteriormente. Ambos contam com o apoio financeiro da RedeGás Energia, rede de excelência do gás natural, que envolve as empresas parceiras: Petrobrás S.A., Transportadora Brasileira do Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG) e a Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS) – que têm interesse em difundir o uso do gás natural no Estado de Santa Catarina.

## **1.2 Histórico**

A fase humana moderna marca o desenvolvimento do cérebro do homem, conferindo-lhe maior senso de mobilidade e grande habilidade na utilização do fogo, bem como no aproveitamento dos minerais. Trata-se do homo-sapiens, que há cerca de 250.000 anos, consolida de uma vez a relação entre o homem e os recursos naturais, tais qual a argila.

Há indícios que mostram que o homem antes da idade da pedra (7.000 a.C.), já utilizava o barro, porém com pouco interesse. Quando o homem passa de nômade para a fase sedentária, ou seja, começa a viver mais concentrado, passando a buscar um certo conforto. Segundo Brancante (1981), com este novo modo de vida, os seres humanos sentiram a necessidade de armazenar água e alimento, passando a utilizar casca de árvore e crânio de animais para este fim. Dessas vasilhas nasceu a cerâmica, que em seu estado natural eram capazes de conter grãos.

Buscando melhor qualidade de vida, o homem passou a usar o barro apenas seco, na construção de casas, muros e torres, pois a argila permitia sua moldagem quando úmida, sendo durável quando seca. Desta forma o barro foi o primeiro veículo que permitiu o homem expor seu senso artístico e prático.

Segundo Resende,(2001) o primeiro uso de tijolo queimado foi na Mesopotâmia, Ur, no ano de 2.300 a.C, sendo a torre de Babel e as muralhas da Babilônia feitas de tijolos. Na história antiga, também em pontos distintos como China, Babilônia e Grécia Helênica são



encontrados elementos de cerâmica vermelha queimados e mesmo glazurados. A China, já na era moderna, usou, além das pedras, muitos tijolos para construir sua grande muralha.

No Egito a utilização de elementos de cerâmica vermelha foi posterior àquela da Mesopotâmia, sobretudo porque as grandes construções egípcias eram edificadas em pedra, material sempre disponível em grandes quantidades. Entretanto, algumas pirâmides, por exemplo, eram construídas internamente com blocos cerâmicos secos e revestidas externamente de pedra. Os egípcios desenvolveram a fabricação de cerâmicas nos mais diversos aspectos e formas. Porém, os tipos mais comuns apresentavam dimensões muito similares às utilizadas atualmente.

Os romanos tiveram grande importância na difusão do tijolo. Levaram para todos os pontos do império e possuíam boa técnica no trabalho da argila. Foram os romanos que estabeleceram a fabricação de cerâmicas como atividade industrial. Mas muito de seus conhecimentos se perderam no obscurantismo da Idade Média. Constatou-se que o famoso incêndio de Londres ocorrido em 1665, fez com que mudasse o aspecto da cidade: da madeira para o barro.

Na Europa, por um longo período, a tecnologia de produção de elementos de cerâmica vermelha seguiu àquela adotada em Roma durante os séculos das grandes conquistas, no que diz respeito à extração da argila, preparação da massa, secagem e queima. O sistema de produção de elementos cerâmicos não sofreu mudanças até o final do século XIX, quando a produção ainda era manual, a secagem era feita ao sol e a queima era realizada em fornos de campanha.

O sistema produtivo começou a sofrer alterações a partir da Revolução Industrial e da introdução da primeira máquina motriz a vapor, com a qual foi possível mecanizar a operação de preparação da massa cerâmica e de extrusão dos elementos e também aumentar a capacidade produtiva. Outro importante salto de qualidade e de quantidade na produção industrial de elementos cerâmicos foi o aparecimento do primeiro forno anular tipo Hoffmann. Foi com este sistema de queima, revolucionário para a época, que se racionalizou a produção, reduzindo-se drasticamente o consumo térmico dos fornos. Com este tipo de forno era possível controlar e regular a alimentação de combustível e a quantidade de ar necessária à combustão, aproveitar os gases de combustão para o preaquecimento dos produtos cerâmicos e recuperar parte do calor proveniente do resfriamento dos produtos queimados. Assim, segundo Facincani (1992), por quase 6.000 anos o sistema de produção de elementos cerâmicos praticamente não sofreu mudanças significativas, sendo que em apenas 40 anos, se experimentou, nesse campo, um enorme progresso tecnológico.

Outro produto da cerâmica vermelha, a telha, teve seu aparecimento na Grécia, por volta de 430 a.C. Porém há indícios remotos de sua existência no Oriente, na China e no

Japão. Seu surgimento aconteceu devido à busca de melhores condições de sobrevivência, quando a argila já havia dado ao homem utensílios e paredes, restando apenas sua cobertura, não limitando assim o homem a habitar no interior de cavernas.

Segundo Resende (2001), o surgimento da produção de cerâmica vermelha no Brasil, remonta ao período colonial. Os registros são poucos e imprecisos. Porém, há registros de produção de tijolos, na qual a técnica empregada teria sido trazida pelos jesuítas, para cobrir suas benfeitorias.

Quando Tomé de Sousa chegou em terras brasileiras em 1549, logo se adiantou em construir uma nova capital para o país, uma vez que Vila Velha não estava bem situada geograficamente. Segundo Guimarães (1981), este ilustre português tornou-se "o primeiro urbanista brasileiro". Naturalmente para a construção da nova cidade, eram necessários materiais de construção, fazendo assim surgir a primeira mineração no país. "Teodoro Sampaio, a respeito da construção da nova capital, conta que o tabuado vinha do Rio Vermelho, a cal, dos arredores de Itapagipe e do esteiro do Pirajá, a telha, das olarias da vizinhança". (Guimarães, 1981)

No entanto, esta atividade toma vulto, podendo ser chamada de indústria, quando o país começa seu processo de urbanização nas primeiras décadas do século XX. Seguindo a evolução industrial do país, é após a Segunda Guerra Mundial que a indústria de cerâmica vermelha efetivamente se afirma no cenário produtivo nacional. Há de se destacar nesta época, o emprego das marombas, equipamento este que amassa e efetua a extrusão das argilas para a produção em escala.

Em Santa Catarina, a fabricação de cerâmica vermelha foi introduzida pelos imigrantes europeus, chegando ao litoral com os açorianos e, ao interior, com os alemães e italianos. As diferentes culturas trouxeram suas diferentes contribuições e características, como os portugueses que utilizavam a cerâmica para a construção de telhados e os alemães que utilizavam a cerâmica na construção de paredes e coberturas. Segundo o Diagnóstico do Setor de Cerâmica Vermelha, publicado pela Secretaria de Estado de Minas e Energia (1990), com a vinda dos imigrantes vieram muitos oleiros que, inicialmente, procuraram a subsistência dedicando-se à agricultura, mas após seu estabelecimento, passaram a exercer sua profissão, surgindo as olarias. Atualmente as cerâmicas encontram-se espalhadas pelo Estado, concentrando-se principalmente no sul, nos vales dos rios Tijucas e Itajaí, no planalto norte e no oeste catarinense.

### **1.3 Panorama da indústria de cerâmica vermelha no Brasil**

Segundo dados da ANICER, publicados em 2003, o número de olarias e cerâmicas é de aproximadamente 12 mil empresas, responsáveis por 650 mil empregos diretos e 2

milhões de empregos indiretos, além de possuir um faturamento em torno de R\$ 6 bilhões, sendo que todo este valor permanece no local.

As empresas brasileiras empregam em média 50 trabalhadores e existe uma produção média por empregado de 13.000 peças/mês. Na Europa o número médio de empregados cai para 20 trabalhadores por empresa, com produção média por empregado de 200.000 peças/mês.

Este setor, de acordo com Bustamente e Bressini (2000), movimenta cerca de 60.000.000 de toneladas de matéria-prima ao ano, refletindo nas vias de transporte e no meio ambiente. O custo de transporte da matéria-prima faz com que as distribuições das unidades produtoras acompanhem as jazidas de argila.

Uma empresa do setor de cerâmica vermelha atua em um raio médio de 250 km, pois a partir deste ponto o transporte inviabiliza seu comércio. No caso de telhas, o alcance da empresa aumenta, podendo chegar a 700 km para telhas especiais. Este fato ilustra a importância de investimento das empresas para desenvolvimento de produtos com maior valor agregado.

#### **1.4 Panorama da indústria de cerâmica vermelha em Santa Catarina**

Segundo dados do Diagnóstico do Setor de Cerâmica Vermelha, realizado pela Secretaria de Ciência e Tecnologia, Minas e Energia em 1990, apresentados por Santos (2001), o número estimado de indústrias de materiais de cerâmica vermelha no Estado de Santa Catarina é de 742 empresas, espalhadas pelas regiões oeste, sul e na região dos vales dos rios Itajaí e Tijucas. Estas empresas geralmente são de pequeno porte, funcionando com estrutura artesanal. Contrastando com a grande maioria, algumas empresas fizeram investimentos significativos em infra-estrutura produtiva, mas não investiram na qualificação da mão-de-obra, fazendo com que o rendimento seja similar ao de empresas mais artesanais.

A cerâmica vermelha gera cerca de 11.000 empregos diretos e 30.000 empregos indiretos, constituindo-se num importante setor do ponto de vista sócio-econômico.

##### **1.4.1 Vales do Itajaí e Tijucas**

- 293 empresas de 41 municípios cadastrados no sindicato
- Produção mensal:
  - 3,4 milhões de telhas
  - 17,1 milhões de blocos cerâmicos

- 105 mil metros quadrados de lajota colonial
  - 350 mil peças de outros produtos
- Número de empregos:
  - 12 mil diretos;
  - 30 mil indiretos.

#### 1.4.2 Região de Chapecó:

- 46 cerâmicas cadastradas distribuídas em 22 cidades, 24 não sindicalizadas;
- Produção mensal (sindicalizadas):
  - 8 milhões de tijolos;
  - 600 mil telhas.
- Número de empregos:
  - 2 mil diretos (sindicalizadas e não sindicalizadas).

#### 1.4.3 Região de Morro da Fumaça:

- 220 empresas filiadas em 6 cidades;
- Produção mensal:
  - 20 milhões de telhas;
  - 80 milhões de tijolos;
  - 105 mil metros quadrados de lajota colonial;
  - 350 mil peças de outros produtos.
- Número de empregos:
  - 7 mil diretos (sindicalizadas e não sindicalizadas).

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Argila**

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que quando umedecido com água geralmente adquire certa plasticidade.

#### **2.2 Cerâmica**

##### **2.2.1 Definição**

Cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não-metálicos, obtidos geralmente através de tratamento térmico em temperaturas elevadas.

##### **2.2.2 Classificação**

O setor cerâmico é amplo e diversificado, por isso é dividido em vários segmentos. Esta separação é feita em função de diversos fatores como matéria prima, propriedades e área de utilização. A seguinte classificação é adotada pela Associação Brasileira de Cerâmica e foi publicada no Anuário Brasileiro de Cerâmica (2003):

##### **a) Cerâmica vermelha**

São denominadas de cerâmica vermelha aquelas com coloração avermelhada empregadas na construção civil (tijolos, telhas, blocos, lajes, lajotas, elementos vazados, argilas expandidas e tubos cerâmicos, também conhecidos como manilhas), além de utensílios de uso doméstico e para decoração.

##### **b) Materiais de revestimento**

Também conhecidos como placas cerâmicas devido ao seu formato, são utilizados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas. Recebem designações tais como: azulejo, pastilha, porcelanato, grês, piso e lajota.

##### **c) Cerâmica branca**

Este grupo compreende materiais com corpo branco e em geral recoberto por uma camada vítrea transparente e incolor e que eram assim agrupados pela cor branca da massa, necessárias por razões técnicas e estéticas. Com o advento dos vidrados opacificados, muitos dos produtos enquadrados neste grupo passaram a ser fabricados com uma coloração alterada. Isto é obtido com o uso de matérias-primas com um certo grau de

impureza, não trazendo prejuízos às características do material para determinadas aplicações. Fazem parte deste grupo as louças sanitárias, as louças de mesa, isolantes elétricos e cerâmicas técnicas para uso químico, elétrico, térmico e mecânico.

#### d) Materiais refratários

Pertencem a este grupo os materiais que têm a finalidade de suportar elevadas temperaturas nas condições de processo e de operação dos equipamentos industriais, que em geral envolvem esforços mecânicos, ataques químicos e variações bruscas de temperatura. Para suportar estas solicitações foram desenvolvidos inúmeros tipos de produtos, a partir de diferentes matérias-primas e misturas. Desta forma são classificados em função de sua matéria prima ou componente principal, como: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, magnésiano-cromítico, cromítico-magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, entre outros.

#### e) Isolantes térmicos

São produtos destinados a isolamento térmico, e podem ser classificados em:

- Isolantes térmicos refratários que se enquadram no segmento de refratários.
- Isolantes térmicos não refratários que compreendem produtos como vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha, que são obtidos por processos distintos aos refratários e que podem ser utilizados, dependendo do tipo de produto, até 1100°C.
- Fibras ou lãs cerâmicas que possuem características físicas semelhantes aos isolantes térmicos não refratários, porém diferem na composição, apresentando sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia, podendo até ser utilizadas em operações de até 2000°C ou mais.

#### f) Cerâmica de alta tecnologia

Os produtos deste segmento da cerâmica foram desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Isto se explica pelo fato destes materiais serem utilizados em áreas de alta tecnologia, como aeroespacial, eletrônica e nuclear e são classificados de acordo com sua função: eletroeletrônicos, magnéticos, ópticos, químicos térmicos, mecânicos, biológicos e nucleares.

## 2.3 Processo produtivo

Os produtos denominados por cerâmica vermelha são fabricados através do processo de extrusão e prensagem. Segundo Wittwer e de Faria (1997), os produtos de

cerâmica vermelha são classificados conforme o processo de fabricação utilizado. Sua coloração é avermelhada devido à presença em sua composição de óxido de ferro, que varia de 3,5 a 8%. Entretanto, com a adição de alguns componentes como óxido de manganês e de titânio, é possível alterar a cor do produto.

A fabricação dos produtos de cerâmica vermelha requer menos energia se comparada à produção de cerâmica branca (azulejos e louças), pois requer uma temperatura menor para sua sinterização.

A figura 1 apresenta o fluxograma que representa o processo de fabricação de cerâmica vermelha.



Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.

**Sazonamento:** O processo se inicia com a extração de diferentes argilas de suas jazidas, para que estas possam compor a matéria prima utilizada para a produção da cerâmica vermelha. As diferentes argilas são colocadas em diferentes lotes, colocadas a céu aberto, conforme a figura 2, para que ocorra a estabilidade nas reações físico-químicas, tendo uma duração que varia de três meses a um ano, de acordo com a argila e a necessidade da empresa: este procedimento é denominado de sazonamento. O processo de intemperismo (sol-chuva), alivia tensões nos produtos conformados, auxilia na plasticidade, na trabalhabilidade da argila e na homogeneização e distribuição da umidade na massa.



Figura 2 – Lotes de argila em sazonalamento

Preparação de Massa: Após a etapa de sazonalamento inicia-se a preparação da massa. Esta etapa começa com a mistura das diferentes argilas, cuja dosagem é feita de acordo com o produto desejado. Na maioria das empresas essa mistura é feita manualmente com pás carregadeiras, que depois colocam a matéria-prima no caixão alimentador, seguindo para o misturador, formando uma matéria homogênea. Este material é colocado em um galpão próprio, onde fica protegido das intempéries e onde se pretende buscar um material homogêneo, tanto em composição, quanto em teor de umidade. As figuras 3 e 4 mostram o caixão alimentador e o misturador, respectivamente.



Figura 3 – Caixão Alimentador



Figura 4 – Misturador



O material pré-misturado é colocado em uma nova linha, constituída de outro caixão alimentador, com a função de dosar a vazão para a produção. Posteriormente o material segue para outro misturador, onde ocorre a quebra dos torrões e a homogeneização da massa juntamente com a água, seguindo para a laminação. Este processo é feito pelo laminador, mostrado na figura 5, que é um equipamento composto de dois cilindros, o qual tem o papel de reduzir a granulometria da argila, preparando-a para o processo de conformação.



Figura 5 – Laminador.

Conformação: Esta etapa é responsável pelo formato final do produto. Para tal a massa preparada passa pela extrusora ou maromba, que está mostrada na figura 6. Esta comprime o material contra uma matriz que confere a forma da seção transversal desejada. Para evitar espaços vazios no interior do produto, que são indesejáveis, o ar é retirado na câmara de vácuo instalada no interior da maromba.

Como a extrusão é um processo contínuo, a massa cerâmica é cortada regularmente, definindo o comprimento da peça. Esta etapa é chamada de recorte.



Figura 6 – Extrusora.

**Secagem:** Em algumas empresas a secagem é feita naturalmente, conforme a figura 7. As peças já conformadas são colocadas em prateleiras fixas ou móveis, ou ainda empilhadas no chão, em um galpão coberto, protegendo-as da chuva, pois a finalidade desta etapa é extrair a umidade do material antes de entrar no forno. Permanecem aí por um período de até seis semanas. Em outras empresas são utilizadas estufas para este fim, aproveitando o calor residual dos fornos, quando dos seus resfriamentos. O material permanece na estufa, de um a dois dias. A umidade final desejada, dependendo do produto, é da ordem de 3 a 4%, ocorrendo uma contração, que pode variar de 4 a 10%. A figura 8 mostra uma estufa de secagem.



Figura 7 – Secagem natural.



Figura 8 – Secagem em estufa.

Segundo a SACTME (1990), no Estado de Santa Catarina, 78% das empresas utilizam secagem natural; 9% utilizam estufa e 13% combinam secagem natural e estufa. Na Região Sul de Santa Catarina concentra-se o maior percentual de estufas, representando 61,5% das empresas que utilizam este tipo de secagem no Estado de Santa Catarina.

A secagem deve ser feita de modo a evitar tensões e conseqüentemente, defeitos na peça. Por isso é necessário eliminar a água de forma lenta e gradual, à temperatura que varia de 50°C a 150°C.

**Queima:** Nessa operação, também conhecida como sinterização, os produtos adquirem suas propriedades finais. As peças secas são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que se situam entre 800°C a 1200°C. A queima é dividida em três fases: aquecimento controlado, da temperatura ambiente até a temperatura desejada; patamar durante o tempo de sinterização na temperatura especificada; resfriamento controlado até a temperatura ambiente. No caso de cerâmica vermelha este ciclo tem duração de dois a três dias. Nesta etapa se encontra toda a demanda de energia térmica do processo de fabricação, salvo quando a secagem é feita com a utilização de ar quente proveniente da recuperação do ar de resfriamento.

**Produto Final:** Após a etapa de queima tem-se o produto final, restando apenas passar pelo controle de qualidade, classificando os produtos de forma que atendam o desejo do cliente. Assim, para uma mesma carga, se obtém produtos com diferentes valores de mercado. Por este motivo, a qualidade final do produto é um parâmetro muito importante quando se trata em viabilizar o uso do gás natural como combustível neste setor da indústria. A qualidade do produto é o reflexo dos processos acima descritos.

## 2.4 Combustíveis utilizados

Para o processo de fabricação da cerâmica vermelha é necessário o dispêndio de uma grande quantidade de energia térmica, podendo ser obtida através da queima de combustíveis ou através do uso de energia elétrica.

Entretanto o alto custo operacional de sistemas que utilizam energia elétrica inviabiliza os seus usos, quando em grandes escalas. Portanto resta saber qual tipo de combustível convém ser queimado no processo, tendo o custo como fator determinante. Desta forma, conforme os dados divulgados pela SACTME em 1990, apresentado na figura 9, a lenha e seus derivados são os mais utilizados neste momento. Porém, alguns produtos exigem a utilização de combustíveis mais nobres, requerendo uma queima sem geração de fuligem.

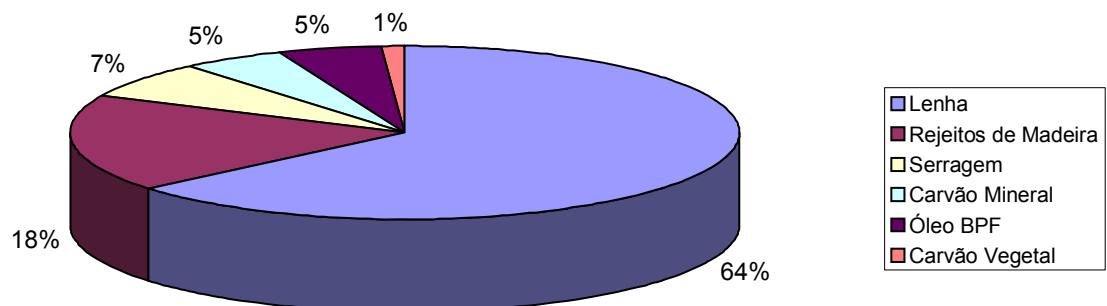


Figura 9 – Consumo de combustível em fornos em Santa Catarina.

A grande demanda local de lenha tem provocado o aumento de seu preço, fato agravado pela falta de reflorestamento. Tal motivo tende a mudar este cenário, abrindo espaço para novos energéticos, como o gás natural.

## 2.5 Uso do gás natural

A recente disponibilidade do gás natural tem despertado o interesse de empresários do ramo cerâmico. Apesar do trabalho visar o estudo do comportamento térmico do forno, o desenvolvimento deste setor da indústria está também relacionado ao combustível utilizado. Com a viabilidade técnica da simples conversão de fornos cerâmicos ao novo energético comprovada, o uso do gás natural como combustível pode trazer vários benefícios ao setor (Néri et al., 2002), tais como:

- Diminuição no desperdício de produtos finais;
- Não requer espaço para estocagem nem estoque do produto;
- Operação mais segura, desde que aplicadas as normas pertinentes;
- Não ser atingido pela falta de matéria-prima (comparado com a lenha);
- Maior controle no processo produtivo;
- Menor custo para manipulação do gás;
- Temperatura de operação mais homogênea e constante;
- Menor consumo de energia;
- Combustível não poluente (sua combustão é isenta de poeiras e cinzas);
- Facilidade de combustão completa;
- Reduzido custo de manutenção do sistema;
- Formatos de chama adequados a cada aplicação;
- Postura ambiental correta;
- Proteção ambiental (no que se refere ao desmatamento e uso de lenha);
- Operação mais limpa e higiênica;
- Não produz óxidos de enxofre (SO);
- Reduz na ordem de 40% a emissão de óxidos de nitrogênio (NO), responsáveis pela chuva ácida e destruição da camada de ozônio;
- Reduz substancialmente a emissão de CO<sub>2</sub>, responsável pelo efeito estufa.

## 2.6 Fornos intermitentes

Os fornos são classificados como intermitentes quando sua produção é feita por “bateladas” e não de forma contínua, como nos fornos tipo túnel. O ciclo de queima de um forno intermitente inicia-se com o carregamento do forno com o material a ser queimado. Com o forno totalmente preenchido o forno é vedado para o início do processo de queima. Após a queima o forno é resfriado até uma temperatura que permita o manuseio do produto.

As principais características destes tipos de fornos são:

- Maior consumo específico ou o baixo rendimento térmico, devido à grande quantidade de calor utilizada para aquecer a estrutura do forno a cada queima e à perda de calor pelos gases de exaustão na chaminé;
- Aquecimento irregular, com a existência de pontos mais frios e mais quentes no interior do forno;
- Necessidade de maior número de operadores;
- Dificuldade para automação da produção.
- Concepção simples e construção mais fácil e rápida;
- Maior flexibilidade da produção, podendo-se queimar materiais distintos e especiais, e materiais com diferentes parâmetros de queima;
- Manutenção sem parada da produção;
- Possibilidade de manutenção mais constante de atmosferas, coloração ou destonificação em toda gama de produtos;
- Possibilidade de compensação das flutuações do mercado e sua demanda, reduzindo-se apenas o número de fornos em operação.

## 2.7 Processo de queima

Como foi citada acima, a fase de aquecimento e de resfriamento devem acontecer de forma controlada porque o material sofre uma série de reações em diferentes intervalos de temperatura. A tabela 1 apresenta as reações e a temperatura que ocorre.

Tabela 1 – Tabela de temperatura de reações.

T (°C)	Reações
100	Secagem final do material ou evaporação da água residual (água higroscópica)
110 – 200	Separação da água (zeolítica) que acompanha alguns minerais argilosos
350 – 600	Decomposição da matéria orgânica ou componentes carbonosos do corpo (liberação de $\text{CO}_2$ )
~500	Separação da água de cristalização (e.g., água estrutural da caulinita)
573	Transformação alotrópica do quartzo de ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) com variação de volume (influência das tensões de aquecimento)
~600	Libertação de flúor (dependendo da composição mineralógica da pasta)
700 – 800	Decomposição e separação dos minerais micáceos
800 – 950	Decomposição dos carbonatos (Liberação de $\text{CO}_2$ )
800 – 1100	Decomposição de sulfuretos e sulfatos
Reações químicas e físicas de cozedura:	
700 – $T_{\text{máx}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variações dimensionais</li> <li>• Redução de porosidade</li> <li>• Aumento da resistência mecânica</li> </ul>
573	Transformação alotrópica do quartzo de ( $\beta \rightarrow \alpha$ ) com variação de volume (influência das tensões de aquecimento).

(Fonte: Campante e Seabra, 2002).

## 2.8 Curva de queima

O processo de queima de um produto cerâmico segue um ciclo pré-estabelecido, também conhecido como curva de queima. A figura 10 ilustra uma curva de queima de forma qualitativa. Esta curva determina a taxa de aquecimento, a temperatura de queima e a taxa de resfriamento, que são determinadas pelas características termoquímicas e geométricas da peça. Esta curva é definida com a preocupação de se obter o material desejado, de forma que sua integridade seja mantida. Além da qualidade, o aspecto econômico tem grande influência na determinação da curva de queima, pois um tempo excessivo de queima gera aumento do consumo de energia e atraso na produção.

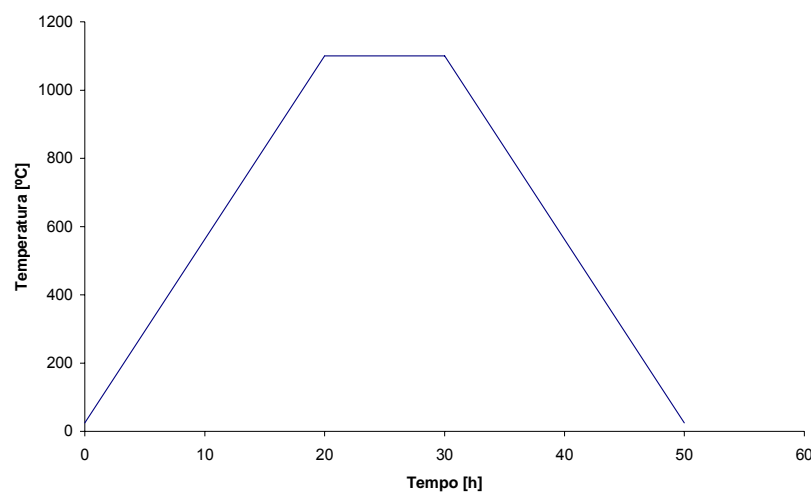


Figura 10 – Curva típica de queima de produtos cerâmicos.

Como cada empresa possui diferentes produtos, feitos com diferentes tipos de matéria-prima e diferentes níveis de controle de secagem, não é possível haver apenas uma única curva de queima para a fabricação de qualquer produto cerâmico, sendo a mesma adaptada conforme as possibilidades da empresa. Por isso os aspectos acima citados devem ser avaliados na busca de uma curva ótima para cada produto.

### 2.8.1 Efeito da água residual

Um grande vilão no processo de aquecimento da peça é a água residual, gerando um grande consumo de energia térmica, além de retardar o processo. Este problema atinge proporções maiores em peças espessas, pois um brusco aquecimento causaria a ebulição da água, o que danificaria a peça. Como solução, no início do processo a temperatura deve ser mantida abaixo de 100°C, como mostra a figura 11, retirando assim a água da peça por capilaridade, e somente após a eliminação de toda água residual, segue-se o processo de aquecimento gradual.

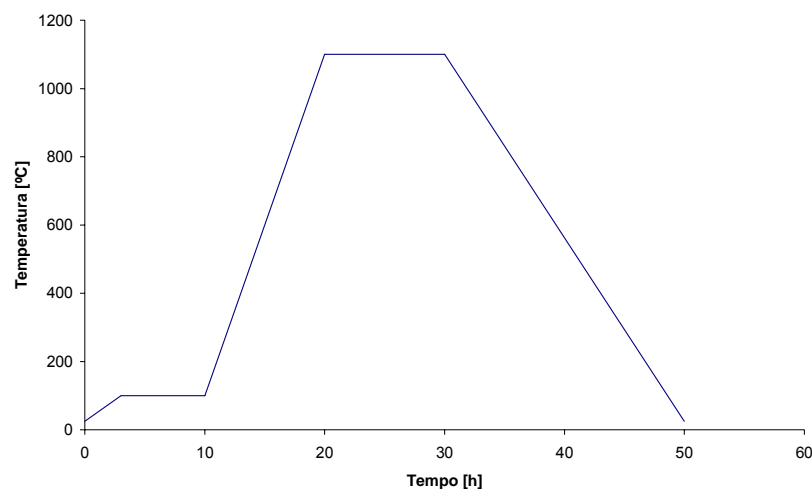


Figura 11 – Efeito causado pela água residual na curva de queima.

### 2.8.2 Efeito da adição de material orgânico

Em busca de um melhor controle da porosidade do produto e de redução de consumo de energia térmica, a adição de material orgânico combustível à matéria-prima é muito comum na indústria de cerâmica vermelha. Esta medida reduz o consumo de energia, pois diminui a massa específica no produto, reduzindo a quantidade de material a ser queimado para a mesma quantidade de peças produzidas, além de gerar reações exotérmicas na queima do material orgânico. Porém, para possibilitar a adição deste material, a queima deve ser mais bem controlada, pois uma queima descontrolada do

material orgânico, pode gerar danos ao produto. Como apresenta a figura 12, todo material é retirado entre 200°C e 500°C.

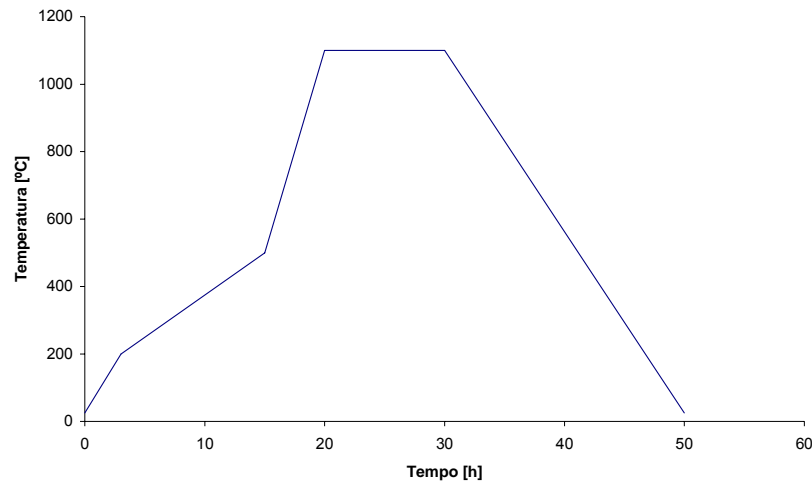


Figura 12 – Efeito causado pelo material orgânico presente nas peças na curva de queima.

### 2.8.3 Transformação do quartzo

O quartzo é um componente presente na matéria prima da cerâmica vermelha. Na temperatura de 573°C, tanto durante o processo de aquecimento quanto no de resfriamento, ele sofre a transformação de quartzo alfa → beta, e isso implica numa variação dimensional muito drástica. Tal variação pode levar a quebra da peça se não for devidamente controlada. Desta forma, o ritmo de aquecimento e resfriamento deve ser diminuído em temperaturas abaixo de 600°C, principalmente em peças com grandes dimensões e alto teor de sílica. A figura 13 mostra uma curva de queima adotada para evitar quebras ocorridas pela transformação do quartzo.

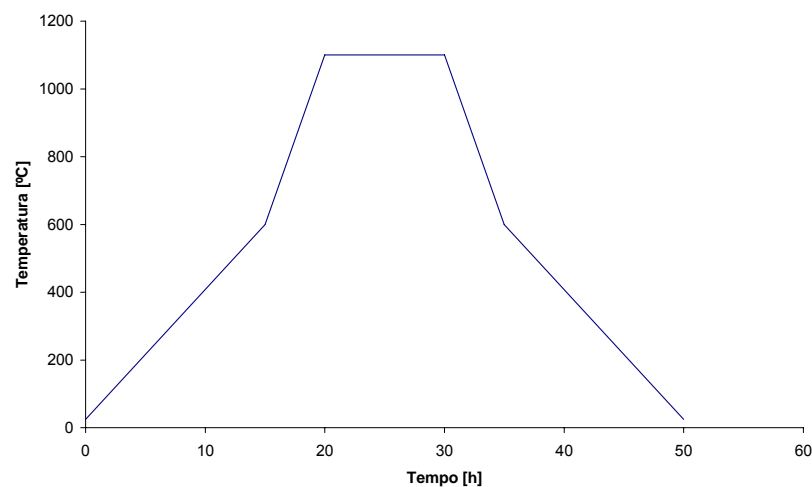


Figura 13 – Curva de queima típica característica para preservar o material dos danos causados pela transformação do quartzo.



### 2.8.4 Efeito do tamanho do produto

Outra grande variável na determinação da curva de queima é a dimensão do produto. Matérias com as mesmas propriedades térmicas, submetidas à mesma temperatura, difundem o calor à mesma velocidade; por isso, peças maiores levam mais tempo para aquecer seu centro. A figura apresenta as curvas de queima de três peças A, B e C de mesmo material, mas de tamanhos diferentes, sendo C maior que B, e B maior que A.

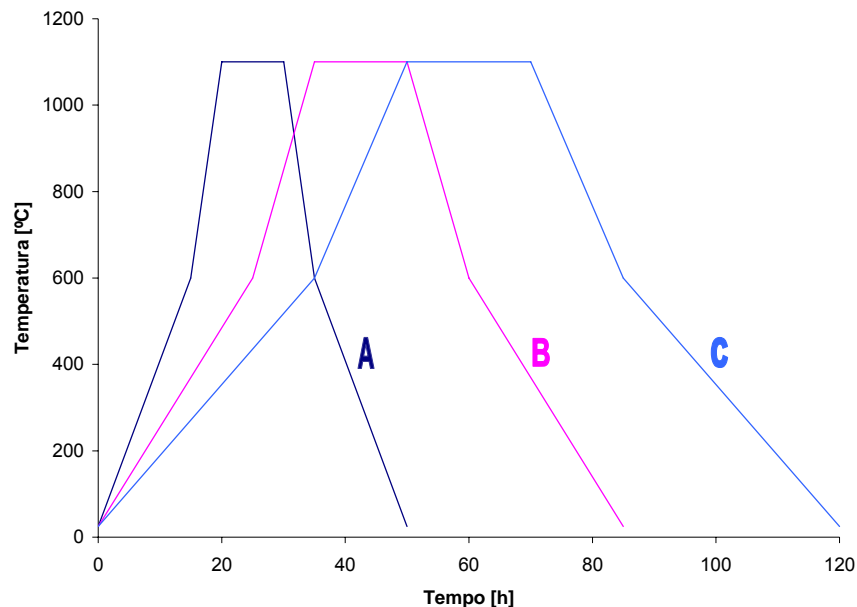


Figura 14 – Variação da curva de queima para diferentes tamanhos de produto.

## 2.9 Modelagem de fornos cerâmicos

As publicações na área de modelagem de fornos cerâmicos são limitadas, tornando-se ainda mais raros em se tratando de fornos intermitentes. Yu (1994), fez uma revisão dos modelos existentes para simulação de fornos túneis, desenvolvidos por diferentes autores.

Abbakumov (1968), apresentou um modelo que considera a condução unidimensional ocorrendo na carga, assumindo regime permanente e fluxo contínuo. A transferência de calor foi limitada à que ocorre entre carga e gases. A transferência de calor radiativa foi aproximada por um coeficiente de transferência de calor. Após o cálculo em cada posição, foram realizadas correções adicionais, levando em conta as perdas de calor, infiltrações de ar e calor absorvido pelas vagonetas. Entretanto, o modelo não correlaciona todos os parâmetros conjuntamente, e a precisão é limitada.

Gardiek e Scholz (1981), assumiram que a carga tinha uma temperatura uniforme em cada seção transversal e que ela movia-se continuamente. O modelo considera a

transferência de calor entre a carga e os gases, mas negligencia as perdas de calor, as infiltrações e os vazamentos de ar. O modelo é limitado quanto à precisão, mas permite um entendimento dos princípios físicos do processo de queima em fornos túneis.

Dugwell e Oakley (1988), apresentaram um modelo no qual foi considerada a condução transiente bidimensional na carga. As temperaturas da carga e dos gases foram calculadas. Entretanto, segundo Yu (1994), este modelo não era condizente com as características dinâmicas de um forno túnel.

Uma característica comum nos modelos apresentados acima é que as temperaturas dos gases foram determinadas, e não calculadas.

Abbakumov e Mociu (1981), propuseram um modelo que considera as equações de balanço de energia e balanço de massa de gases e de carga, somente na zona de queima do forno. O modelo considera a transferência de calor em regime permanente, sendo que, a quantidade de calor transferida dos gases para a carga, as paredes do forno e as vagonetas foi considerada conhecida. Os parâmetros a serem determinados eram: o consumo de combustível (gás natural), o consumo de ar primário, o fluxo de gases e sua composição e a diferença de temperatura máxima nos espaços entre cargas adjacentes. Os demais parâmetros eram todos conhecidos, tal como o número de queimadores, a temperatura nos queimadores, as perdas de calor nos queimadores e exaustores e a temperatura do ar primário. Os autores aplicaram seu modelo matemático a uma simulação computacional e controlaram diversos parâmetros de um forno túnel. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com dados experimentais.

Yu (1994), apresentou um modelo matemático que descreve os processos dinâmicos de um forno túnel. O modelo é baseado nas equações de balanço de energia, da continuidade dos gases e de balanço de massa, e considera a condução transiente de calor ocorrendo na carga e nas vagonetas, nas três zonas do forno. Segundo Yu(1994), os processos dinâmicos de um forno túnel são dominados justamente pela condução transiente bidimensional na carga e nas vagonetas. O modelo considera a taxa de entrada de carga, ou seja, o intervalo de tempo no qual uma vagoneta, carregada de produtos ainda não queimados, é empurrada para o interior do forno e, simultaneamente, outra vagoneta, carregada de produtos queimados, é empurrada para fora do forno. Os perfis de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na zona de queima são conhecidos de acordo com os produtos a serem fabricados e os tipos e dimensões do forno, similarmente ao modelo de Abbakumov e Mociu (1981). O consumo de combustível, o fluxo de gases de exaustão e os fluxos de ar primário e de ar de resfriamento são determinados para manter a distribuição de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na direção axial, de modo a se obter produtos de alta qualidade, reduzir os custos de operação, principalmente com combustível, e proteger o meio ambiente da poluição do ar. Yu(1994);

também apresentou simulações associadas a um forno túnel de 72 metros de comprimento, utilizado para queima de tijolos. Foram feitas simulações com duas diferentes atmosferas, um perfil de temperatura dos gases e três diferentes tipos de estruturas isolantes de vagonetas. Os resultados obtidos apresentaram uma boa concordância com a situação prática, mostrada pelos dados experimentais apresentados no trabalho de Xu (1984).

Justo (1999), apresentou um programa de simulação de um forno intermitente com tiragem ascendente, utilizado na cerâmica vermelha. Utilizando o método de volumes finitos, o problema de transferência de calor foi analisado através de um mecanismo difusivo/convectivo, em um domínio tridimensional em regime transiente. O forno foi simulado utilizando gás natural como combustível, e o processo de combustão em cada queimador foi representado por uma geração de calor interna no volume que ocupa a posição da chama. Como simplificação o autor assume como conhecida a distribuição de velocidade dos gases no interior do forno e desconsidera a convecção no interior da carga, a influência da radiação na transferência de calor no interior do forno, bem como as reações presentes no material a ser queimado. Para esse trabalho tomou como modelo um forno intermitente instalado na Cerâmica Santa Rosa, localizada no município de Ceará-Mirim, Rio Grande do Norte. Para sua solução foi usada uma malha constituída por 1.521 volumes. A simulação compreende 12 horas de queima do forno, sendo este tempo baseado no tempo real de funcionamento do forno para que atinja a temperatura de queima. Este tempo foi dividido em 20 intervalos, sendo assim, igual número de iterações. Os resultados foram apresentados e analisados através de gráficos que mostram a distribuição de temperatura para diferentes planos do forno, assim como a mudança de temperatura ao longo do tempo num determinado volume. Os resultados de temperatura da atmosfera do forno tiveram boa concordância, porém os resultados obtidos no interior da carga não foram tão condizentes com a realidade. Isto se deve a desconsideração da troca por convecção no interior da carga, considerando apenas a troca de calor por condução.

Santos(2001), modelou um forno túnel de 80 metros, tendo como foco o forno existente na Cerâmica Heinig, no município de Brusque, Santa Catarina. Trata-se de um modelo tridimensional, que simula o comportamento térmico do forno, levando em consideração as trocas de calor entre seus diferentes componentes. O modelo considera que o mecanismo da condução ocorre nas paredes laterais, na abóbada, no piso, no solo, nas vagonetas e na carga de material. Também é levada em conta a transferência de calor por convecção entre os gases que circulam no interior do forno com as partes constituintes do mesmo. O modelo trata a carga como um volume permeável, sendo o aquecimento ocasionado pela troca por convecção com os gases, além de considerar a participação da radiação. Os resultados obtidos com o modelo proposto, foram comparados com valores obtidos experimentalmente e mostraram boa concordância.

## CAPÍTULO 3

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Descrição Técnica do Forno Estudado

##### 3.1.1 Localização

O forno modelo utilizado para obter dados experimentais do funcionamento de um forno intermitente encontra-se na Cerâmica Solar (figura 15), situada na cidade de Forquilha, no sul do estado de Santa Catarina. Esta empresa foi escolhida como modelo por ter disponibilizado suas instalações para um estudo de viabilidade do uso do gás natural neste setor da indústria.



Figura 15 –Indústria Cerâmica Solar.

A Cerâmica Solar possui vários fornos idênticos, usando um a cada dia, num período de queima de 30 a 32 horas, além do resfriamento do produto, que leva em torno de 48 horas.

O principal produto da Cerâmica Solar é a lajota glazurada de 30x30 *cm* com uma produção mensal de lajotas de 17.000  $m^2/mês$  (20 *fornadas/mês* – 850  $m^2/fornada$ ). Cada peça dupla pesa 3,6 *kg*, com uma quantia de 5,5 *peças/m<sup>2</sup>* (11 *metades/m<sup>2</sup>*).

### 3.1.2 Características técnicas

Os fornos utilizados na Cerâmica Solar são do tipo “paulistinha”. Trata-se de um forno de alvenaria, com 1 m de espessura de parede, onde se localizam seis fornalhas regularmente espaçadas. A figura 16 apresenta um desenho esquemático do forno “paulistinha”. Neste tipo de forno a tiragem dos gases provenientes da combustão é feita no piso, através da depressão causada por um exaustor ou uma chaminé. Os gases quentes presentes na parte superior do forno são succionados, passando pelo interior da carga. Por este motivo, estes fornos são classificados como de chama invertida.

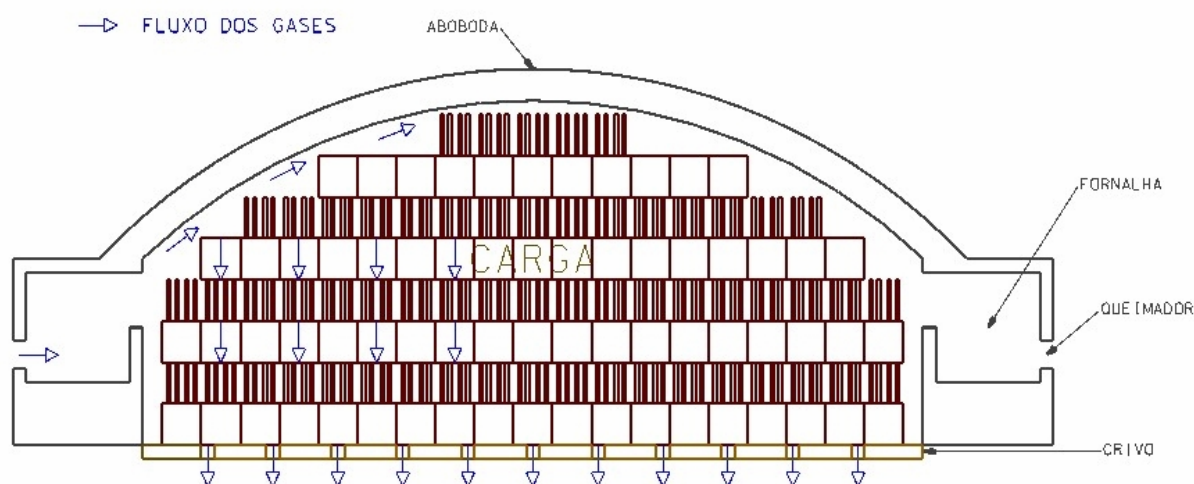


Figura 16 – Desenho esquemático do fluxo de gases no interior do forno.

#### 3.1.2.1 Fornalhas

As fornalhas do forno são feitas de tijolos refratários para suportar temperaturas superiores a 1400°C durante a queima. A base da fornalha possui um formato plano para possibilitar a utilização da lenha. Seu teto possui seção transversal em forma de arco pela facilidade de construção, tendo em vista que um teto plano necessitaria de grande reforço para manter sua integridade, quando exposta a alta temperatura. A figura 17 apresenta uma fornalha aberta, com um queimador de óleo instalado.

As fornalhas permanecem abertas somente para a utilização de lenha para facilitar sua alimentação, que é feita manualmente. Quando é queimado óleo nas fornalhas, elas são fechadas com tijolo e argila para diminuir as perdas de calor para o ambiente.

Como a utilização do gás natural permitia a realização do processo com um único combustível, as fornalhas foram refeitas para receber esse novo energético. Estas passaram a serem fechadas, de forma definitiva. O queimador foi posicionado no interior de uma pedra

refratária que suporta altas temperaturas e não permite que o calor gerado no queimador se propague para o exterior da fornalha, por condução.



Figura 17 – Fornalha aberta com queimador a óleo.

#### 3.1.2.2 Piso ou crivo do forno

O piso, também conhecido como crivo, é feito com tijolos maciços e vazados, colocados de forma intercalada, desta forma preservando pequenos canais por onde os gases deixarão o forno. Este piso possui a função básica de suporte da carga e uma função importante de controle do fluxo de gases no interior da carga. A distribuição radial de suas aberturas no piso, apresentada na figura 18, bem como o número destas, determina o padrão do escoamento no interior do forno.



Figura 18 –Crivo do forno.

### 3.1.2.3 Abóbada ou teto do forno

O teto do forno, também conhecido como abóbada, é feito de tijolos comuns, agrupados com massa refratária. Para maior resistência, a abóbada possui o formato de uma calota com raio de curvatura de 8,5 m, com espessura de parede de 23 cm.

Como a parte superior do forno é a região onde se encontram as temperaturas mais elevadas, uma parede simples, sem isolamento, proporciona uma elevada perda de calor para o ambiente. Visando reduzir esta perda, sobre ela foi colocada uma camada de isolamento, composta simplesmente por cinzas de casca de arroz, devido ao seu baixo custo de implementação.

### 3.1.2.4 Chaminé

A chaminé do forno possui 15 m de altura, com diâmetro de 2,5 m na base e de 1,0 m no topo. Por motivo estrutural sua base possui a espessura de dois tijolos comuns – cerca de 46 cm – passando a apenas um tijolo na altura de 2 m.

### 3.1.2.5 Funcionamento do forno

O processo se inicia com o forno sendo preenchido com o material a ser queimado, que é feito manualmente através de uma porta. Esta é fechada com tijolos e argila, sendo preservada uma pequena janela, por onde o operador fará o acompanhamento do processo.

Com o forno fechado inicia-se o processo de secagem final e pré-aquecimento, com pequenas vazões de combustível. Cerca de 15 horas após o início do pré-aquecimento, inicia-se a etapa de queima, quando o material é aquecido até 1100°C, preparando-o para a glasura, que confere um acabamento vitrificado às peças. Para tal é adicionado sal e bórax nas fornalhas. O início da glasura, que dura até 6 horas, é determinado pelo operador, conforme mostrado na figura 19, retirando amostras de material do interior do forno e fazendo uma avaliação visual das mesmas. Ao final do processo, os queimadores são desligados, as fornalhas fechadas, bloqueando a entrada de ar frio no forno, iniciando-se a etapa de resfriamento, no caso um resfriamento bastante lento. Este prossegue até o material alcançar 500°C – finalizando a transformação do quartzo – quando então a porta do forno é aberta e é colocado um ventilador para a injeção de ar frio, acelerando o processo.

Quando o ambiente do forno se encontra em torno de 40°C o material é retirado, passando por um controle de qualidade, ilustrado pela figura 20, para ser embalado e comercializado.

Antes da conversão do forno, na fase de secagem e pré-aquecimento era utilizada a lenha como combustível. Assim, somente quando o material se encontrava completamente seco passava-se para o uso do óleo BPF. Desta forma havia a necessidade da instalação



dos queimadores de óleo para o prosseguimento do processo até a queima total do produto. A passagem da queima de lenha para a queima de óleo gerava um certo transtorno operacional e no próprio processo produtivo. As figuras 21 e 22 apresentam queimadores a óleo e a gás natural, respectivamente.

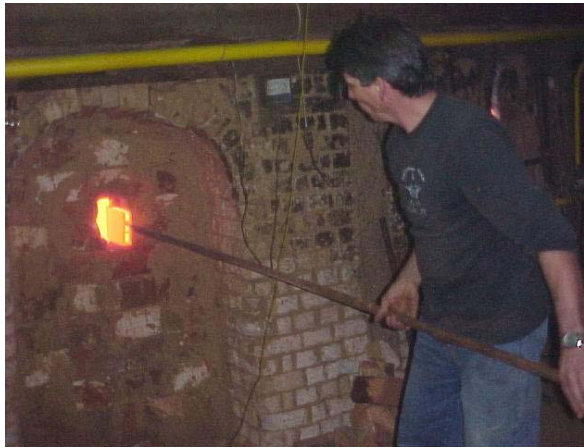


Figura 19 –Operador retirando uma amostra.



Figura 20 – Controle de qualidade.



Figura 21 – Queimador à óleo.



Figura 22 – Queimador à gás natural.

O processo não era conduzido com apenas um combustível antes da conversão, pois nenhum se adequava ao processo inteiro. A lenha não se adequava ao processo de queima devido a grande produção de cinzas que aderem na peça durante a etapa de glasura. Por sua vez o óleo não permitia o início do processo, pois havia necessidade de pouca energia e de um grande volume de ar para a fase de secagem e pré-aquecimento. O



sistema de queima de óleo, bastante rudimentar, não permitia uma regulação de combustão nestas condições e a lenha era necessária.

### 3.2 Aquisição de Dados Experimentais

Seguindo a metodologia do trabalho, foram realizadas medições de alguns parâmetros com a finalidade de obter informações para a validação do modelo matemático. Para isto, foi feito um mapeamento da temperatura do interior do forno, do canal que conduz os gases que saem do forno para a chaminé e das fornalhas. Também foram extraídos dados da composição química dos gases provenientes da combustão, bem como sua vazão e o consumo de combustível.

#### 3.2.1 Medição de Temperatura

Para as medições de temperatura, que variam de 25°C a 1100°C, foram utilizados termopares tipo K com revestimento cerâmico. Estes foram colocados em tubos de aço 1020, com o intuito de protegê-los do ambiente corrosivo propiciado pela etapa de glasura. Foram instalados termopares no interior e no exterior, num total de 20, com vistas a uma avaliação completa do processo. A instalação foi feita a partir da porta de entrada do forno, na abóbada e na parede lateral. A figura 23 apresenta um desenho do forno, com o posicionamento dos termopares.

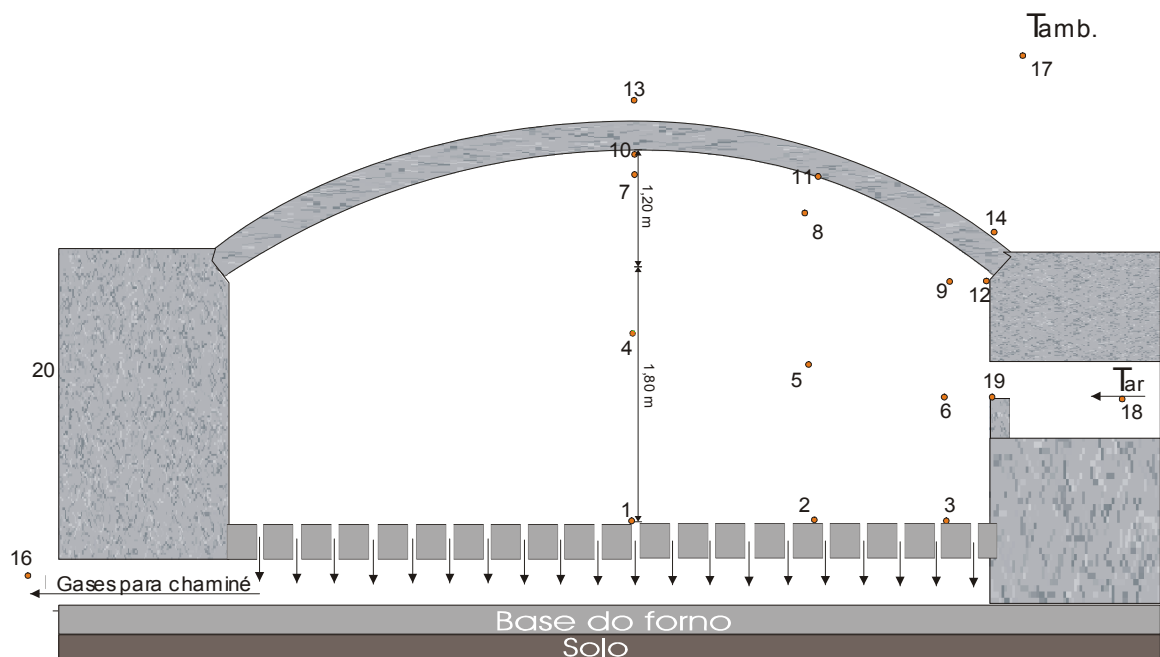


Figura 23 – Desenho do forno com o posicionamento dos termopares.

Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados, onde foram registradas todas as temperaturas lidas em um intervalo de tempo determinado. Com o equipamento todo instalado, a carga de material foi colocada no forno, sua porta foi fechada e iniciada a queima. As medições foram feitas em um forno da Cerâmica Solar, seguindo os procedimentos normais de queima, descritos anteriormente. As figuras 24 e 25 mostram os termopares posicionados na abóbada e o sistema de aquisição.



Figura 24 – Termopares posicionados na abóbada do forno.



Figura 25 – Sistema de aquisição de dados.

Nas primeiras medições, a curva de queima foi adquirida completamente, desde o aquecimento até o final do resfriamento. Para este procedimento foram necessários 5 dias de acompanhamento das medições, refletindo num alto custo para execução desta atividade. Sendo o aquecimento e a queima o foco do trabalho, buscando um maior volume de dados, as medições passaram a se restringir a essas duas etapas do processo.

As temperaturas nas fornalhas foram medidas com um pirômetro ótico, com ajuste da emissividade das mesmas em 0,9.

### 3.2.2 Medição do consumo de combustível

O consumo de combustível é um parâmetro muito relevante em uma avaliação energética de um forno cerâmico, pois toda energia térmica consumida no processo é proveniente da queima do combustível. Assim em toda rodada de medição era registrado o valor do consumo de combustível gasto no processo, seja lenha, óleo ou gás natural.

No início do trabalho, o processo era conduzido utilizando-se lenha para a secagem e pré-aquecimento, e óleo para a queima e glasura do produto. A quantidade de lenha consumida em uma “batelada” foi fornecida pelo operador do forno, que fazia a alimentação de forma manual. Já o óleo combustível era armazenado em um tanque cilíndrico, disposto

horizontalmente com um marcador graduado, possibilitando identificar a variação de volume no seu interior, porém com baixa precisão.

O sistema de gás natural instalado para a queima provém de uma ERPM – estação de redução de pressão e medição, mostrada na figura 26. Esta estação tem a função de reduzir a pressão do gás, bem como medir seu consumo. O consumo de gás natural é medido através de um medidor de volume escoado, mostrado na figura 27.

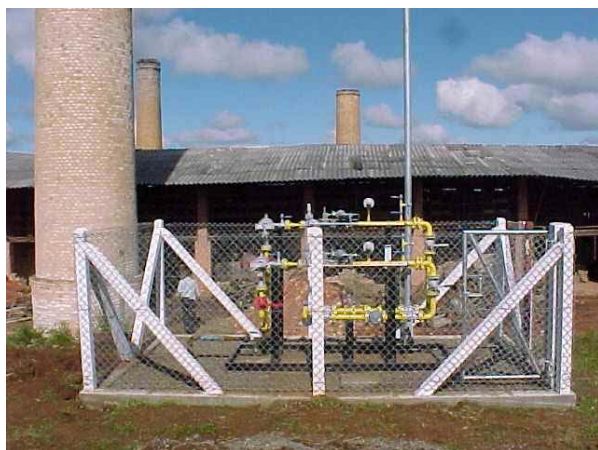


Figura 26 – Visão geral da ERPM.



Figura 27 – Medição do consumo de GN.

### 3.2.3 Análise da composição química dos gases

As condições dos gases resultantes da queima de materiais orgânicos são determinadas pelo comportamento da reação de combustão. Sendo assim, visando um melhor aproveitamento energético, tal informação é de grande valia para ajustar a relação entre ar e combustível, para a operação.

Para a obtenção desses dados foi utilizado um analisador de gases portátil fabricado pela empresa Kane, modelo KM9106, capaz de identificar e quantificar, em determinadas faixas, a presença de  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$  e  $SO_2$ , além de calcular a quantidade de  $CO_2$ , bastando identificar o combustível em seu banco de dados.

O equipamento é dotado de uma sonda que permite ao usuário alcançar, ou ao menos se aproximar do lugar desejado para a medição. O uso deste equipamento fica limitado a temperaturas de até  $600^\circ C$ ; por isso sua utilização se restringiu às etapas de secagem, pré-aquecimento e início do aquecimento.

### 3.2.4 Ensaios laboratoriais

Para a caracterização da argila empregada, foram realizados alguns ensaios laboratoriais. Tais ensaios foram realizados no Centro de Tecnologia de Materiais –

CTCmat/SENAI, situado em Criciúma/SC. Assim foram enviadas amostras de duas jazidas distintas denominadas AF 01 e AC 73, utilizadas durante as medições.

#### 3.2.4.1 Análise química da argila

O primeiro passo em busca de uma avaliação da matéria prima é determinar sua composição química. A tabela 2 apresenta a composição das duas amostras avaliadas.

Tabela 2 – Composição química das amostras de argila.

	AF 01	AC 73
SiO <sub>2</sub> [% em massa]	67,76	69,97
MgO [% em massa]	0,56	0,66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [% em massa]	17,55	17,88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [% em massa]	4,67	1,78
CaO [% em massa]	0,05	0,07
Na <sub>2</sub> O [% em massa]	0,08	0,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [% em massa]	0,09	0,04
K <sub>2</sub> O [% em massa]	1,78	2,69
MnO [% em massa]	0,03	0,01
TiO <sub>2</sub> [% em massa]	0,91	0,72
Perda ao fogo [% em massa]	6,53	6,06

#### 3.2.4.2 Análise térmica diferencial da argila – DTA

A análise térmica diferencial é um ensaio que emprega dois termopares conectados diferencialmente, de modo que suas forças eletromotrizes sejam opostas. Uma das juntas do termopar está conectada à amostra de material a analisar, enquanto a outra está conectada a uma referência. O material normalmente utilizado como referência é a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que não reage durante o aquecimento. Como a amostra e a referência são aquecidas linearmente a uma taxa controlada, as reações que ocorrem na amostra são apresentadas na curva como picos (indicando reações exotérmicas) ou vales (indicando reações endotérmicas). As mesmas reações que resultam em uma perda de massa na análise termogravimétrica, têm um efeito térmico associado, o qual pode também ser detectado utilizando-se a análise térmica diferencial. Entretanto, há reações que ocorrem no estado sólido, tal como a cristalização, que não são acompanhadas por alterações de massa. Em geral, as curvas dos ensaios TG e DTA são plotadas em um mesmo gráfico, sobre um eixo de temperatura comum.

### 3.2.4.3 Análise termogravimétrica – TG

A análise termogravimétrica consiste em submeter uma porção da amostra a uma taxa de aquecimento, normalmente constante. Durante o aquecimento, sua massa é continuamente medida. As reações que ocorrem durante o aquecimento, que são acompanhadas por uma mudança de massa, podem ser identificadas dentro do intervalo de temperatura no qual elas ocorrem.

Foram realizados ensaios com as duas amostras diferentes, com o objetivo de identificar a variação de massa em função da temperatura, assim identificando as faixas de temperatura onde ocorrem as reações. A argila AF01 – de cor vermelha, tem os resultados apresentados na figura 28, enquanto a argila AC73 – de cor palha, tem os resultados na Fig. 28. Estas argilas são usadas separadamente para gerar os produtos de cores diferentes.

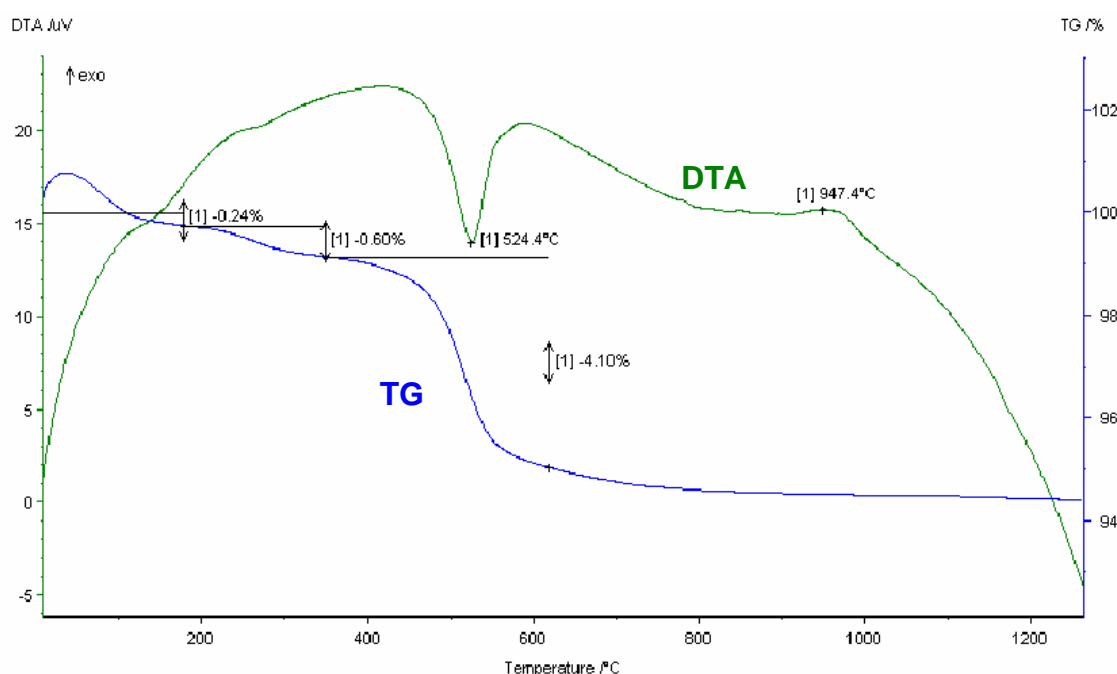


Figura 28 – DTA e TG para a argila AF01.

Nestas figuras o eixo da esquerda apresenta os valores da diferença de potencial ( $\mu\text{V}$ ), medidos na análise térmica diferencial (DTA) e o eixo da direita apresenta os valores da perda de massa (%), medida na análise termogravimétrica (TG).

Na figura 28, a curva termogravimétrica mostrou que até a temperatura de 180 °C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 0,24 %, relativa à saída de água adsorvida. Entre 180 °C e 350 °C, aproximadamente, houve uma perda de massa de 0,60 %, devido à desidroxilação de algum hidróxido e/ou decomposição de matéria orgânica.

Em 524,4 °C a análise térmica diferencial apresentou um pico endotérmico relativo à desidroxilação da caulinita, com uma perda de massa de 4,10 %. Ao atingir a temperatura de 947,4 °C ocorreu um pico exotérmico, relativo à formação de espinélios que gerarão a mulita.

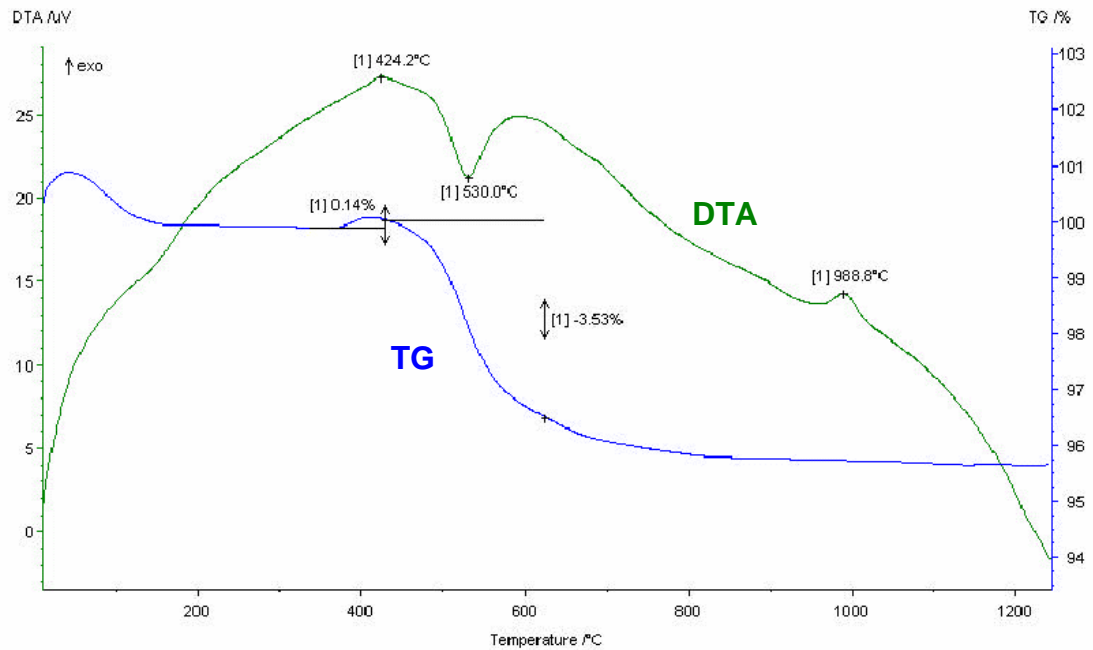


Figura 29 – DTA e TG para a argila AC73.

Já na figura 29, relativa à argila AC 73, a análise térmica diferencial acusou que em 424,4 °C ocorreu um pico exotérmico, provavelmente proveniente da oxidação de algum composto da amostra, com um ganho de massa de 0,14 %. Em 530,0 °C ocorreu um pico endotérmico, relativo à desidroxilação da caulinita, com uma perda de massa de 3,53 %. Quando a amostra atingiu 988,8 °C ocorreu um pico exotérmico relativo à formação de espinélios que gerarão a mulita.

## **CAPÍTULO 4**

### **MODELAGEM MATEMÁTICA**

A simulação numérica tem sido uma poderosa ferramenta de auxílio na solução de diversos problemas da engenharia, resolvendo problemas relativamente complexos de uma forma rápida e menos dispendiosa, quando comparada a métodos experimentais. Neste estudo foi utilizado um modelo matemático com a finalidade de simular o comportamento térmico do forno estudado, e validado a partir de dados experimentais obtidos em campo. Com esta ferramenta pretende-se obter informações necessárias para um melhor conhecimento do funcionamento de fornos cerâmicos intermitentes, muito comuns na indústria de cerâmica vermelha.

Para a determinação das equações que vieram a compor este modelo matemático de transferência de calor, foram realizados balanços de energia nos diversos elementos constituintes do forno, por exemplo, a carga de material a ser queimado, e a parede do forno. Para a realização dos balanços de energia foram considerados os três processos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Por se tratar de um problema transiente, o termo temporal foi mantido nos balanços de energia.

A troca de calor por condução foi considerada na carga de material, na abóbada, na parede, no piso, na base e no solo. O mecanismo de convecção foi considerado nas trocas de calor entre os gases internos e a superfície interna da parede, a superfície interna da abóbada, a carga de material e o piso por serem “vazados”, além da troca de calor por convecção entre o ar exterior e as superfícies externas da abóbada e da parede. Já a troca de calor por radiação foi considerada entre a carga de material e a parede interna, entre a carga do material e a superfície interna da abóbada e entre as peças que compõe a carga de material, sendo desconsiderada a troca entre as superfícies internas da parede e da abóbada.

Para a melhor solução do problema e pela necessidade da identificação da temperatura em diversos pontos de um mesmo elemento, estes elementos foram subdivididos em várias partes, assim melhorando a discretização do problema. A tabela 2 relaciona o elemento constituinte do problema com o número de pontos de discretização e equações geradas. A discretização considerou vários anéis, desde o núcleo central do forno até a parede externa. Na direção radial 10 anéis foram considerados na carga e dois na parede lateral do forno. Na direção vertical o número de anéis da carga variou de 27, no centro, até 16, junto à parede externa. Como a carga apresenta uma fração muito elevada de vazios, com as lajotas colocadas na vertical, formam-se canais tanto na direção vertical quanto na horizontal, permitindo a circulação dos gases de combustão. Idêntico número de anéis foi considerado para os gases no interior da carga, além de anéis adicionais entre o topo da carga e a abóbada do forno (neste caso 1 anel de altura, com 10 anéis radiais). A



abóbada foi dividida em uma parte externa e outra interna, tendo cada uma um total de 10 anéis. O piso do forno, que é a parte que tem contato direto e que suporta a carga, foi dividido em parte superior e inferior. Cada uma foi dividida em 10 anéis no interior do forno, mais 2 anéis sob a parede lateral do forno. O piso possui canais verticais por onde passam os gases de combustão que deixam a carga, no sentido descendente. Estes gases na região do piso também foram “discretizados” formando um total de 20 anéis. Sob o piso existem os canais que conduzem os gases para o canal da chaminé e este espaço recebeu o nome de gases da base do forno, sendo discretizado com 10 anéis sob a região da carga e mais 2 anéis sob a parede lateral. Finalmente a base do forno, última camada do forno, em contato com o solo, foi dividida como o piso, entretanto sem haver circulação de gás no seu interior. A figura 30 apresenta um esquema da discretização do problema.

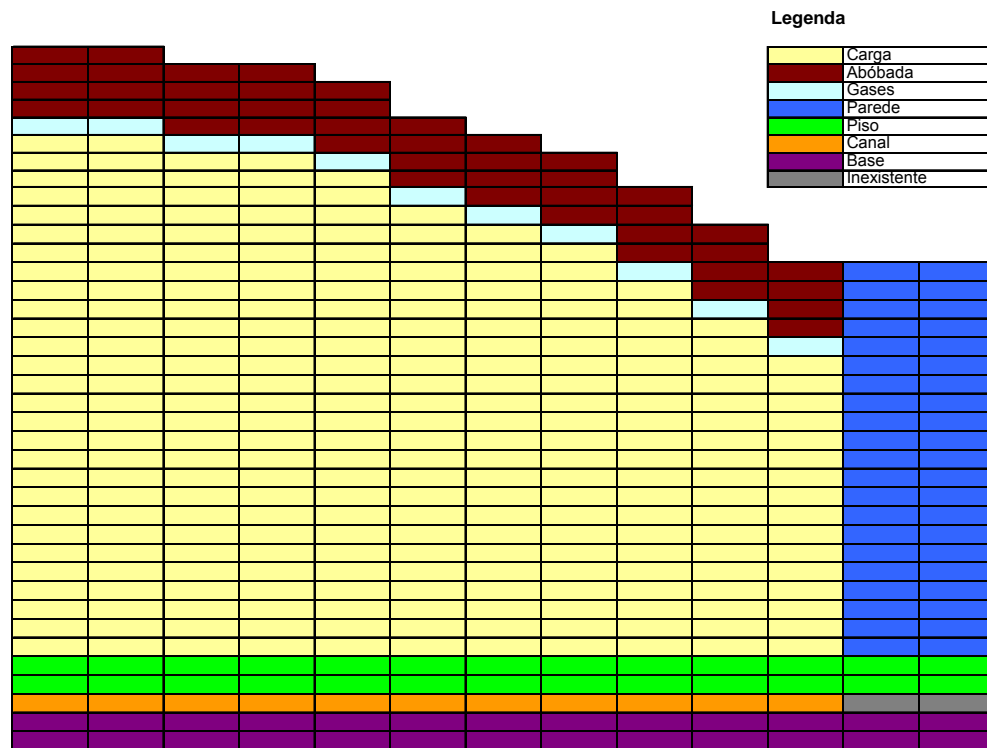


Figura 30 – Discretização do problema.

Sendo o forno de formato circular (figura 16), foi adotada a simetria azimutal, reforçada pelo fato de possuir 6 fornalhas regularmente distribuídas ao longo do perímetro externo. Assim as grandezas calculadas variam com o raio e com a altura, não havendo variação com o ângulo polar. Desta forma, pode-se solucionar um problema tridimensional, resolvendo equações em duas dimensões, sem que houvesse perda de informações.



Tabela 3 – Elementos do programa de simulação, número de equações e de pontos de discretização.

Elementos constituintes	Número de equações	Pontos de discretização
Carga	9	228
Gases no interior da carga	7	238
Abóbada	6	20
Parede do forno	11	40
Piso do forno	10	24
Gases do piso do forno	2	20
Gases da base do forno	4	12
Base do forno	10	24
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>606</b>

#### 4.1 Balanço de energia

##### 4.1.1 Equação dos elementos de carga

A partir das equações do balanço de energia, pode-se obter o perfil de temperatura em função do tempo, de todos os elementos constituintes do forno. A equação (4.1) corresponde ao balanço de energia realizado para um ponto de discretização da carga. Esta equação considera a troca de calor por convecção com ar quente que atravessa o elemento de carga, a troca por condução e por radiação com os pontos vizinhos, além da geração de energia causada pelas reações de evaporação da água e de desidroxilação da caulinita ocorridas no interior do material. Assim sendo este somatório deve ser igual ao ganho de energia deste elemento.

$$q_k'' \cdot A_{\text{sup},k} + q_c'' \cdot A_{\text{sup},c} + q_r'' \cdot A_{\text{sup},r} + \dot{E} \cdot V = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

Onde  $q_k''$  representa o fluxo de calor condutivo por unidade de área que atravessa as fronteiras do elemento,  $A_{\text{sup},k}$  representa a área da superfície de troca de calor por condução com o elementos vizinhos,  $q_c''$  representa o fluxo de calor convectivo por unidade de área que atravessa as fronteiras do elemento,  $A_{\text{sup},c}$  representa a área da superfície de troca por convecção com o gás circulante,  $q_r''$  representa o fluxo de calor radiativo por unidade de área que atravessa as fronteiras do elemento,  $A_{\text{sup},r}$  representa a área da superfície de troca por radiação com o elementos vizinhos,  $\dot{E}$  representa a energia por unidade de volume gerada ou consumida por um elemento,  $\rho$  é a densidade do material da carga,  $V$  representa o volume do elemento,  $c_p$  é o calor específico do material da carga e  $\frac{\partial T}{\partial t}$  é a variação da temperatura ao longo do tempo.

Desprezando o calor gerado através das reações de evaporação e de desidroxilação da caulinita, tem-se a seguinte equação:

$$q_k'' \cdot A_{\text{sup},k} + q_c'' \cdot A_{\text{sup},c} + q_r'' \cdot A_{\text{sup},r} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

Rearranjando a equação nas três dimensões,

$$k \cdot A_{\text{sup},k} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + h \cdot A_{\text{sup},c} \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) + q_r'' \cdot A_{\text{sup},r} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

Considerando simetria azimutal, onde a temperatura não varia em função do ângulo  $\theta$ ,

$$k \cdot A_{\text{sup},k} \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + h \cdot A_{\text{sup},c} \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) + q_r'' \cdot A_{\text{sup},r} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

Utilizando a técnica dos volumes finitos, a equação (4.5) representa a forma discretizada para o elemento central inferior, sendo o primeiro termo referente à inércia do elemento de carga, os três seguintes correspondem às trocas de calor por condução com os elementos vizinhos, o quinto elemento representa o aquecimento da carga pelo ar quente através da troca por convecção, e os três últimos são as parcelas de troca de calor com as superfícies vizinhas por radiação.

$$\begin{aligned} & \frac{\rho \cdot A_{tc}(j) \cdot c_p \cdot s_c}{\Delta t} \cdot (T_c^{i+1}(i, j) - T_c^i(i, j)) = \frac{k_c \cdot A_{tc}(j)}{s_c} \cdot (T_c^i(i+1, j) - T_c^i(i, j)) \\ & + \frac{k_c \cdot A_{tc}(j)}{\frac{s_c}{2}} \cdot (T_{ps}^i(j) - T_c^i(i, j)) + \frac{2\pi \cdot s_c \cdot k_c}{\ln(3)} \cdot (T_c^i(i, j+1) - T_c^i(i, j)) \\ & + h_{cc}(j) \cdot A_{ac} \cdot (T_{gf}(i, j) - T_c^i(i, j)) + \frac{\sigma \cdot A_{tc}(j)}{\frac{1}{\varepsilon_{sc}} + \frac{1}{\varepsilon_{sc}} - 1} \cdot (T_c^{i4}(i+1, j) - T_c^{i4}(i, j)) \\ & + \frac{\sigma \cdot A_{tc}(j)}{\frac{1}{\varepsilon_{sp}} + \frac{1}{\varepsilon_{sc}} - 1} \cdot (T_{ps}^{i4}(j) - T_c^{i4}(i, j)) + \frac{\sigma \cdot A_{tc}(j)}{\frac{1}{\varepsilon_{sc}} + \frac{1}{\varepsilon_{sc}} - 1} \cdot (T_c^{i4}(i, j+1) - T_c^{i4}(i, j)) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície em questão.

A figura 24 apresenta, de forma esquemática, os componentes do balanço de energia para elemento central da carga junto ao piso, considerados para a obtenção da equação (4.5). Trata-se de um elemento cilíndrico, cujo eixo coincide com o eixo do forno, tendo como vizinhos outros elementos da carga e o elemento central da parte superior do piso. As trocas de calor estão indicadas pelas setas, sendo que a numeração corresponde

aos termos indicados na equação seguinte. Cada vizinho contribui com termos de condução e de radiação, restando ao gás que circula o termo de troca por convecção. A troca por condução se justifica pela ligação sólida existente entre os elementos, seja através do contato entre as lajetas, seja através do material das mesmas, quando estas ultrapassam as fronteiras dos elementos. Devido a existência de vazios no interior da carga, foram considerados também os termos de troca de calor por radiação.

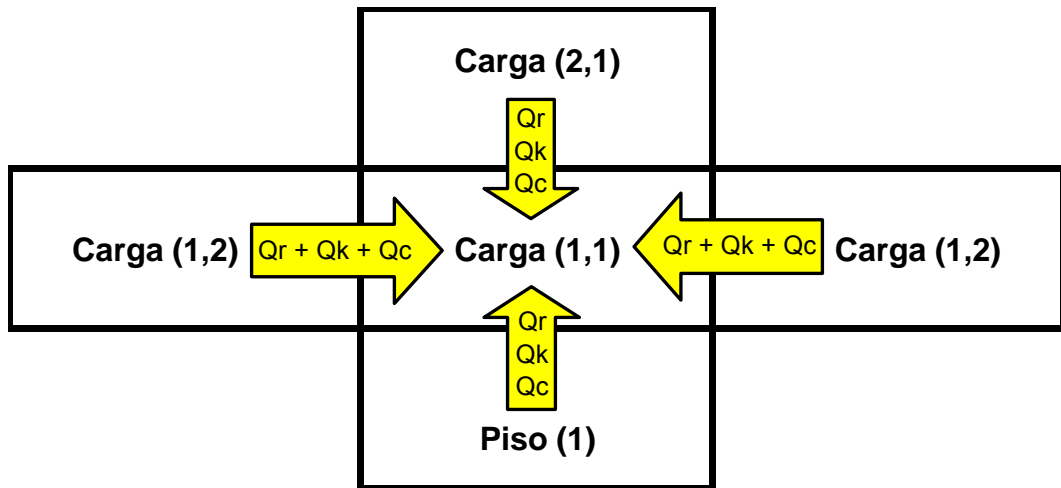


Figura 31 – Elemento de volume da carga utilizado no processo de discretização.

#### 4.1.2 Equação dos gases no interior da carga

No modelo matemático, os elementos de carga foram definidos como permeáveis, permitindo a passagem de ar no seu interior. Desta forma, para cada elemento de carga existe, de forma sobreposta, um elemento de gás. A equação 4.6 corresponde ao balanço de energia de um elemento dos gases presentes no interior do forno.

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{Gcomb} \cdot A_{lc}(j) \cdot s_C \cdot cp_{Gcomb}}{\Delta t} \cdot (T_{Gf}^{i+1}(i,j) - T_{Gf}^i(i,j)) &= h_{Cc}(j) \cdot A_{Ac}(j) \cdot (T_C^i(i,j) - T_{Gf}^i(i,j)) \\ + m_{Gf}(i+1,j) \cdot cp_{Gcomb} \cdot (T_{Gf}^i(i+1,j) - T_{ref}) - m_{Gf}(i,j) \cdot cp_{Gcomb} \cdot (T_{Gf}^i(i,j) - T_{ref}) \\ + m_{Gcomb} \cdot F_{gasv}(i,j) \cdot F_{gas}(j) \cdot cp_{Gcomb} (T_{Gcomb}^i - T_{ref}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

O termo à esquerda da equação representa a parcela de inércia térmica de um elemento gasoso junto ao elemento da carga descrito pela equação (4.5), enquanto que o primeiro termo da direita é referente à troca de calor por convecção entre os gases quentes e a carga neste ponto do domínio. A diferença entre o segundo e terceiro termo corresponde à variação de energia presente nas massas de gases que atravessam as fronteiras do elemento. O último termo corresponde a parcela dos gases provenientes da combustão que ainda não sofreu influência da carga.

#### 4.1.3 Equação dos elementos da parede

Como o modelo em questão considera a parede do forno como parte do domínio de soluções, foi realizado um balanço de energia nos elementos da parede, em diferentes posições. A equação (4.7) exemplifica o balanço de energia em um elemento da face interna da parede, em contato com o piso do forno.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_{I1} \cdot A_{Tpin} \cdot s_C \cdot cp_{I1}}{\Delta t} (T_{Pin}^{i+1}(i) - T_{Pin}^i(i)) &= (k_{I1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{s_C}{\ln(rmifrif)}) \cdot (T_{Pmi}(1) - T_{Pin}(1)) \\
 + k_{I1} \cdot \frac{A_{Tpin}}{s_C} \cdot (T_{Pin}(i+1) - T_{Pin}(i)) &+ k_P \cdot \frac{A_{Tpin}}{\left(\frac{s_C}{2} + \frac{s_P}{4}\right)} \cdot (T_{Ps}(nerc+1) - T_{Pin}(i)) + \\
 h_{Cpin}(i) \cdot A_{Lpin}(i) \cdot (T_{Gf}(i, nerc) - T_{Pin}(i)) &+ \sigma \cdot \frac{A_{Lc}(nerc)}{\left(\left(\frac{1}{\epsilon_{Sc}}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{sip}}\right) - 1\right)} \cdot (T_C(1, nerc)^4 - T_{Pin}(i)^4)
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Assim como a equação dos elementos de carga, o termo a esquerda da equação representa a variação de energia no tempo. Os três termos seguintes correspondem à troca de calor por condução com os elementos vizinhos. O próximo termo quantifica a transferência de calor por convecção com os gases presentes no interior do forno. O mecanismo de troca de calor por radiação entre a superfície interna da parede e a superfície da carga está contemplada no último termo.

#### 4.1.4 Equação da abóbada

Por se tratar de uma região com temperaturas muito elevadas, a abóbada, quando mal isolada termicamente, representa grandes perdas ao processo. Visando avaliar os possíveis benefícios conseguidos através da adição de um material isolante na parte exterior da abóbada do forno, esta foi dividida em várias “camadas”, podendo uma delas ser formada por um material isolante.

A equação (4.8) representa um balanço de energia aplicado no elemento central e interno da abóbada. Como o elemento interno da abóbada é um elemento maciço, cercado por elemento de mesma característica, o único mecanismo de transferência de calor é a condução.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_A \cdot A_{Tc}(j) \cdot \frac{s_A}{2} \cdot cp_A}{\Delta t} \cdot (T_{Am}^{i+1}(j) - T_{Am}^i(j)) &= K_A \cdot \frac{A_{Tc}(j)}{s_A} \cdot (T_{Ai}(j) - T_{Am}(j)) \\
 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{s_A}{2}\right) \cdot \frac{K_A}{\ln(3)} \cdot (T_{Am}(j+1) - T_{Am}(j)) &+ K_{I3} \cdot \frac{A_{Tc}(j)}{s_{I3}} \cdot (T_{Ae}(j) - T_{Am}(j))
 \end{aligned} \quad (4.8)$$

#### 4.1.5 Equação do piso do forno

A equação (4.9) modela a variação de temperatura em um elemento da face superior do piso localizado no centro do forno. Para a discretização desta equação, foram considerados todos os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo de aquecimento do piso: a troca de calor por condução, com a carga, com a parte inferior do piso com o anel externo vizinho; convecção com os gases do piso; radiação com a carga.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_{Piso} \cdot \frac{S_P}{2} \cdot A_{Tc}(j) \cdot cp_{piso}}{\Delta t} \cdot (T_{Ps}^{i+1}(j) - T_{Ps}^i(j)) &= \frac{k_C \cdot a_{Tc}(j)}{\frac{S_C}{2}} \cdot (T_C(1,j) - T_{Ps}(j)) \\
 + k_{Piso} \cdot \frac{A_{Tc}(j)}{S_P} \cdot (T_{Pi}(j) - T_{Ps}(j)) &+ 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{S_P}{2} \right) \cdot \frac{k_{Piso}}{\ln 3} \cdot (T_{Ps}(j+1) - T_{Ps}(j)) \\
 + h_{cp}(j) \cdot A_{Ap}(j) \cdot (T_{gps}(j) - T_{Ps}(j)) &+ \frac{\sigma \cdot A_{Tc}(j)}{\left( \left( \frac{1}{\epsilon_{Sc}} \right) + \left( \frac{1}{\epsilon_{Sp}} \right) - 1 \right)} \cdot (T_C(1,j)^4 - T_{Ps}(j)^4)
 \end{aligned} \quad (4.9)$$

#### 4.1.6 Equação dos gases do piso do forno

O piso do forno, também conhecido como crivo, é a via de saída dos gases de dentro do forno; sendo assim, foi modelado como um elemento permeável, da mesma forma que a carga. O balanço dos gases que se encontram na parte superior do forno está representado na equação (4.10).

O primeiro termo representa a variação de temperatura dos gases ao longo do tempo. Tal variação deve ser igual à variação da quantidade de energia com que os gases entram e saem do elemento, bem como à troca de calor por convecção com os elementos do piso.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_{gcomb} \cdot \frac{S_P}{2} \cdot A_{Tc}(j) \cdot cp_{gcomb}}{\Delta t} \cdot (T_{gps}^{i+1}(j) - T_{gps}^i(j)) &= h_{cp}(j) \cdot A_{ap}(j) \cdot (T_{ps}(j) - T_{gps}(j)) \\
 + m_{gf}(1,j) \cdot cp_{gcomb} \cdot (T_{gf}(1,j) - T_{ref}) &- m_{gf}(1,j) \cdot cp_{gcomb} \cdot (T_{gps}(j) - T_{ref})
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

#### 4.1.7 Equação da base do forno

A equação (4.11) descreve o balanço de energia aplicado em um elemento central da base do forno. O primeiro termo representa a variação de energia presente no elemento ao longo do tempo. Tal variação é causada pela troca de calor por condução com o elemento externo e inferior, representados respectivamente pelo segundo e terceiro termo

da equação, pela convecção com os gases da base, e a transferência de calor por radiação entre a superfície inferior do piso e a superfície superior da base.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_{base} \cdot \frac{S_b}{2} \cdot A_{Tc}(j) \cdot cp_{base}}{\Delta t} \cdot (T_{bs}^{i+1}(j) - T_{bs}^i(j)) &= \frac{k_{base} \cdot A_{Tc}(j)}{S_b} \cdot (T_{bl}(j) - T_{bs}(j)) \\
 + 2\pi \frac{S_b}{2} \cdot \frac{k_{base}}{d \log(3)} \cdot (T_{bs}(j+1) - T_{bs}(j)) &+ h_{cb}(j) \cdot A_{Tc}(j) \cdot (T_{gb}(j) - T_{bs}(j)) \\
 + \frac{\sigma \cdot A_{Tc}(j)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \cdot (T_{pi}(j)^4 - T_{bs}(j)^4) &
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

#### 4.1.8 Equação dos gases da base do forno

A equação (4.12) foi obtida através do balanço de energia de um elemento dos gases que circulam na base do forno, antes se dirigir à chaminé. Dessa maneira é possível identificar os mecanismos de perdas. O primeiro termo da equação é a variação de energia do elemento ao longo do tempo. Os três termos seguintes representam a troca de calor por convecção dos gases com elemento do piso e da base. A diferença dos dois termos restantes quantifica a variação de energia que um determinado fluxo de gases sofre ao atravessar esse elemento.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_{gcomb} \cdot S_{canal} \cdot A_{Tc}(j) \cdot cp_{gcomb}}{\Delta t} (T_{gb}^{i+1}(j) - T_{gb}^i(j)) &= h_{cb}(j) \cdot A_{Tc}(j) \cdot (T_{bs}(j) - T_{gb}(j)) \\
 + h_{cp}(j) \cdot A_{Tc}(j) \cdot (T_{pi}(j) - T_{gb}(j)) &+ h_{cb}(j) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{if} \cdot S_{canal} \cdot (T_{gb}(j+1) - T_{gb}(j)) \\
 + m_{gf}(1, j) \cdot cp_{Gcomb} \cdot (T_{gpi}(j) - T_{ref}) &- m_{gf}(1, j) \cdot cp_{Gcomb} \cdot (T_{gpb}(j) - T_{ref})
 \end{aligned} \quad (4.12)$$

As equações estão colocadas na forma explícita, separando-se o valor da temperatura referente ao ponto em questão para o novo instante de cálculo, no caso  $T^{i+1}$ . As demais temperaturas são referentes ao instante anterior e, portanto, são todas conhecidas.

## 4.2 Balanço global de energia

Através do balanço global de energia é possível identificar todos os mecanismos de perda do processo, bem como quantificar a parcela consumida por cada um destes mecanismos. Toda energia fornecida é destinada às perdas ou ao aquecimento. São consideradas perdas normais, as parcelas de energia que atravessa a fronteira do domínio, e aquecimento, o ganho de energia dos elementos.

### 4.2.1 Perdas pela parede

Com a temperatura externa da parede calculada, através da equação (4.13) é possível determinar as perdas de calor por convecção e por radiação pelas paredes.

$$Q_p^i = h_{cp} \cdot A_{pe} (T_{pe} - T_{Amb}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{pe} (T_{pe}^4 - T_{Amb}^4) \quad (4.13)$$

#### 4.2.2 Perdas pela abóbada

Com a temperatura externa da abóbada calculada, através da equação (4.14) é possível determinar as perdas de calor por convecção e por radiação pela mesma para o ambiente.

$$Q_A^i = h_{cA} \cdot A_A (T_{Ae} - T_{Amb}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_A (T_{Ae}^4 - T_{Amb}^4) \quad (4.14)$$

#### 4.2.3 Perdas pela base

Com a temperatura da superfície externa da base calculada, através da equação (4.15), é possível determinar as perdas de calor por condução para o solo, sendo a temperatura do solo conhecida e constante.

$$Q_p^i = k_{solo} \cdot \frac{A_{base}}{L} \cdot (T_{base} - T_{solo}) \quad (4.15)$$

#### 4.2.4 Perdas pela chaminé

Com a temperatura e o fluxo dos gases da chaminé, é possível determinar a quantidade de energia que deixa as fronteiras do domínio. A perda de calor com os gases da chaminé é calculada através da equação (4.16).

$$q_{CH}^i = \dot{m}_{GCH} \cdot c_{PG} \cdot (T_{GCH} - T_{Amb}) \quad (4.16)$$

#### 4.2.5 Ganho de energia da carga de material

Para o material sofrer as transformações do cozimento é necessário ser aquecido até uma temperatura pré-determinada. Ao final do processo de sinterização, o material se encontra aquecido com uma grande quantidade de energia acumulada. Ao final do processo, ao contrário do que acontece nos processos contínuos, que utilizam forno túnel, essa energia é eliminada sem ser reaproveitada, portanto deve ser computada como perda no balanço global de energia. Esta parcela de energia é calculada através da equação (4.17).

$$Q_c = V_c \cdot \rho_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_c - T_{Amb}) \quad (4.17)$$

#### 4.2.6 Ganho de energia da parede do forno

De maneira análoga ao acúmulo de energia através da carga de material, a parede do forno também acumula energia durante o processo, que depois não será recuperada. Assim, a equação (4.18) quantifica esta parcela de energia.

$$Q_p = V_p \cdot \rho_p \cdot cp_p \cdot (T_p - T_{Amb}) \quad (4.18)$$

#### 4.2.7 Ganho de energia da abóbada do forno

De maneira análoga ao ganho de energia da carga de material, a abóbada do forno acumula energia durante o processo, que depois não é recuperada, estimada pela equação (4.19).

$$Q_a = V_a \cdot \rho_a \cdot cp_a \cdot (T_a - T_{Amb}) \quad (4.19)$$

#### 4.2.8 Ganho de energia do piso do forno

A parcela de energia consumida para aquecer o piso do forno é representada pela equação (4.20).

$$Q_{Piso} = V_{Piso} \cdot \rho_{Piso} \cdot cp_{Piso} \cdot (T_{Piso} - T_{Amb}) \quad (4.20)$$

#### 4.2.9 Ganho de energia da base do forno

A base do forno também possui certa inércia térmica e ao ser aquecida, acumula uma quantidade de energia estimada pela equação (4.21), seguinte:

$$Q_B = V_B \cdot \rho_B \cdot cp_B \cdot (T_B - T_{Amb}) \quad (4.21)$$

#### 4.2.10 Ganho de energia dos gases do forno

O volume de gás que ocupa o interior do forno, juntamente com a carga, também é aquecido e acumula energia, embora em uma quantidade bastante inferior àquela acumulada pela carga. O valor deste ganho está previsto na equação (4.22).

$$Q_{Gf} = V_{Gf} \cdot \rho_{Gf} \cdot cp_{Gf} \cdot (T_{Gf} - T_{Amb}) \quad (4.22)$$

#### 4.2.11 Ganho de energia dos gases do piso do forno

Também conforme a parcela anterior, o piso contém um certo volume de gás em seus canais. Estes gases estão inicialmente na temperatura ambiente e são aquecidos até a temperatura final  $T_{GPiso}$ . A energia acumulada é dada pela equação (4.23).

$$Q_{GPiso} = V_{GPiso} \cdot \rho_{GPiso} \cdot cp_{GPiso} \cdot (T_{GPiso} - T_{Amb}) \quad (4.23)$$

#### 4.2.12 Ganho de energia dos gases da base do forno

Da mesma forma que as duas parcelas anteriores existe acúmulo de energia nos gases que ocupam a base do forno, dado pela equação (4.24).



$$Q_{GB} = V_{GB} \cdot \rho_{GB} \cdot cp_{GB} \cdot (T_{GB} - T_{Amb}) \quad (4.24)$$

### 4.3 Programa de simulação

Com base no modelo matemático apresentado, foi estruturado um programa de simulação em linguagem *Fortran*, capaz de calcular as temperaturas de todos os elementos do domínio, além de fornecer um balanço global, identificando a destinação de cada parcela de energia demandada no processo. Este programa foi denominado *Simfint* – Simulação de Fornos Intermitentes.

Subrotinas são empregadas para cálculos diversos, como para a parte de combustão, empregando-se os diversos combustíveis como lenha, óleo BPF e gás natural. Fornecendo-se o tipo de combustível, a sua vazão ao longo do tempo, bem como o excesso de ar, obtém-se como resposta a vazão e a temperatura dos gases de combustão que irão aquecer o forno. Outra subrotina é usada para o cálculo da distribuição da vazão destes gases nos diversos elementos da carga do forno, através da simulação de coeficientes escolhidos de forma a se obter perfis de temperatura de acordo com as medições.

#### 4.3.1 Subrotina Dimpfint

A subrotina Dimpfint apresenta os valores referentes às dimensões do forno, bem como de cada elemento constituinte, sendo estes variáveis de acordo com a posição em que se encontram. Também cabe a esta subrotina apresentar ao programa as propriedades dos materiais que compõem o problema, como a condutividade térmica, o calor específico, a emissividade e a densidade.

#### 4.3.2 Subrotina Combint

A subrotina Combint apresenta ao programa todas informações referentes ao processo de combustão. A partir da composição química dos combustíveis, a subrotina calcula o poder calorífico, a vazão de ar de combustão e a temperatura dos gases provenientes da queima (Bazzo, 1995). Para isso devem ser fornecidos a vazão de combustível e o excesso de ar empregado.

Como este programa foi desenvolvido para avaliar a conversão de fornos intermitentes, de óleo e lenha para o gás natural, esta subrotina contém informações sobre a composição química destes três combustíveis.

#### 4.3.3 Subrotina Hgfint

A subrotina Hgfint fornece ao programa os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção. Estes valores constituem dados de entrada do programa e devem ser obtidos antes de seu uso, através de modelos diversos, não incorporados ao programa Fortran (Incropera e De Witt, 1992)

#### 4.3.4 Subrotina Mgfint

A função da subrotina Mgfint é determinar o fluxo de massa de gases em cada posição do forno. Para isso ela determina a vazão de gás que entra e sai de cada elemento do forno.

A distribuição dos gases no interior do forno é uma função paramétrica pré-definida por Nicolau (2001), não havendo cálculos sobre a mecânica dos fluidos neste modelo.

#### 4.3.5 Funcionamento do programa

O programa começa com a extração dos valores contidos e calculados pelas subrotinas. A partir desses valores o programa inicia o processo iterativo de cálculo das temperaturas e perdas até o limite final do tempo de queima. Por se tratar de um problema transiente, estas informações são calculadas e armazenadas até o problema atingir o final. A figura 32 apresenta o fluxograma da estrutura do programa.

Como condição inicial tem-se que o forno está na temperatura ambiente. Com todas as equações na forma explícita o programa é executado, sendo o passo de tempo dado por  $\Delta t$ . No caso observou-se um valor limite de  $\Delta t = 0,4$  segundos, apresentando problemas de divergências para avanços maiores. Este comportamento é típico do método explícito, mas optou-se pelo mesmo, pela facilidade de montagem das equações, que ficam na forma mostrada anteriormente, equações (4.5) a (4.12), como exemplo. Como o ciclo de queima no forno é bastante longo (4 a 5 dias para o total de queima e resfriamento), o número de iterações é bastante elevado.

Também está implementado no programa um balanço de energia ao longo do processo de queima, indicando o destino de cada parcela propiciada pela queima do combustível. Como o processo ocorre em regime transiente, parte da energia é armazenada pelos elementos constituintes do forno e pela carga. Uma parcela restante será perdida para o ambiente. Este balanço é executado entre o início da queima e o instante em que o combustível é interrompido. A energia armazenada nos elementos constituintes do forno e na carga será restituída ao longo do resfriamento. Entretanto como a mesma não é aproveitada em outros processos, constitui-se também em uma perda de energia.

O programa de simulação é capaz de fornecer a curva de temperatura ao longo do tempo, de todos os elementos constituintes do forno, além dos valores de perda instantânea ao longo do tempo, bem como a acumulada em todo o processo.

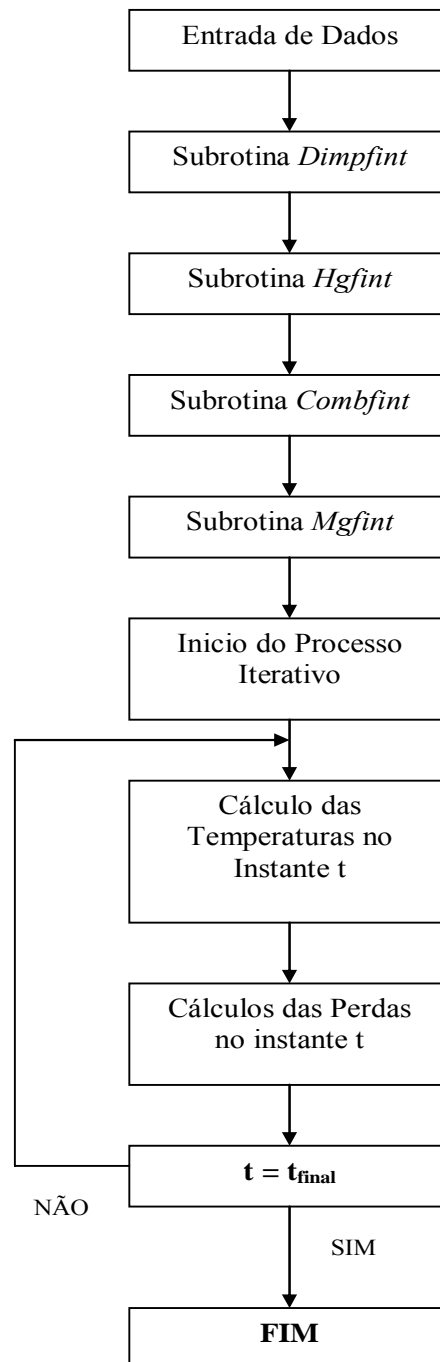


Figura 32 – Fluxograma do Programa de Simulação.

Os resultados de temperatura têm grande relevância na avaliação do gradiente de temperatura no interior do forno em cada instante de tempo. Já os valores de perda de calor auxiliam na identificação das deficiências funcionais e construtivas do processo. Ambos são de grande valia na otimização do processo, seja em sua concepção, seja durante o funcionamento.

#### 4.3.6 Condições de contorno

Como condições de contorno foram considerados os fluxos de calor por convecção natural e por radiação nas superfícies externas da parede e da abóbada do forno. A temperatura ambiente foi considerada constante. No centro do forno, foi considerada a inexistência de fluxo de calor e de massa, pela condição de simetria azimutal. Na base do forno foi considerada a existência de um fluxo de calor por condução para o solo, sendo este mantido a uma temperatura constante a uma certa profundidade.

A entrada de massa e energia, representando os gases de combustão, foi representada como um termo em cada elemento de gás, introduzido pelas fornalhas dispostas ao longo do contorno do forno.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 Resultados experimentais preliminares

A primeira medição teve como objetivo a definição de parâmetros para a validação do modelo matemático, além de servir como base comparativa para a quantificação de eventuais melhorias no processo. Esta medição foi feita seguindo os procedimentos normais de queima. Foram extraídos valores de temperatura em diversos pontos do forno, de forma que todo seu interior fosse mapeado, com o objetivo inicial de ajustar a formulação matemática desenvolvida para este trabalho.

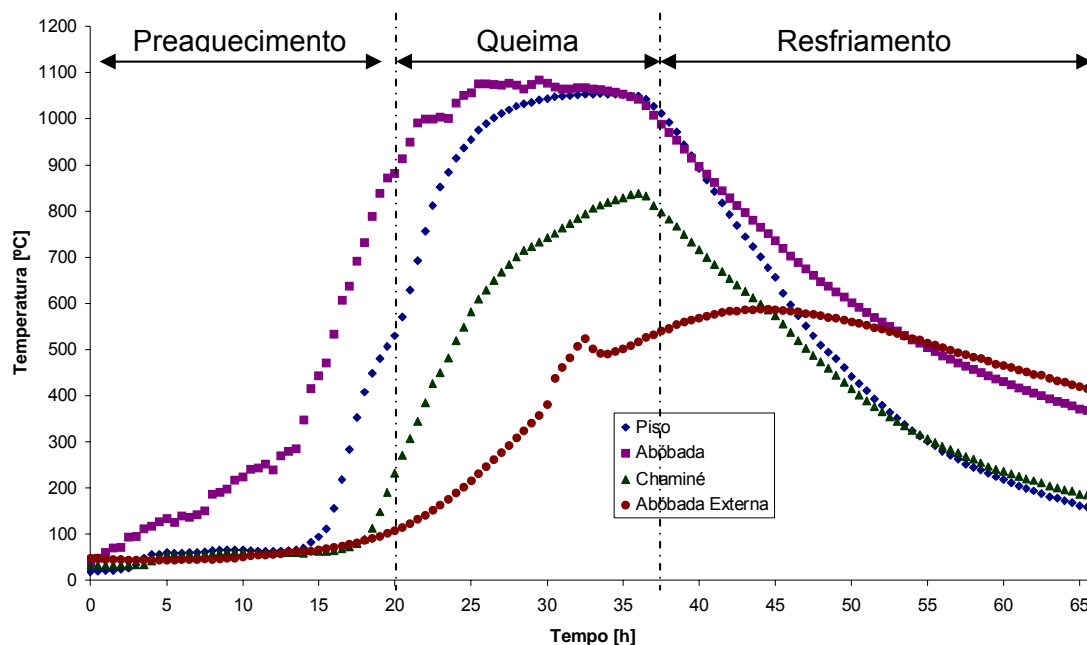


Figura 33 – Variação de temperatura ao longo do tempo em alguns pontos do forno.

A figura 33 apresenta o gráfico de temperatura obtida experimentalmente em alguns pontos do forno. Tais pontos, ilustrados na figura 34, são referentes às temperaturas do centro do forno próximo à abóbada e ao piso, à temperatura dos gases na chaminé e à temperatura externa da abóbada.

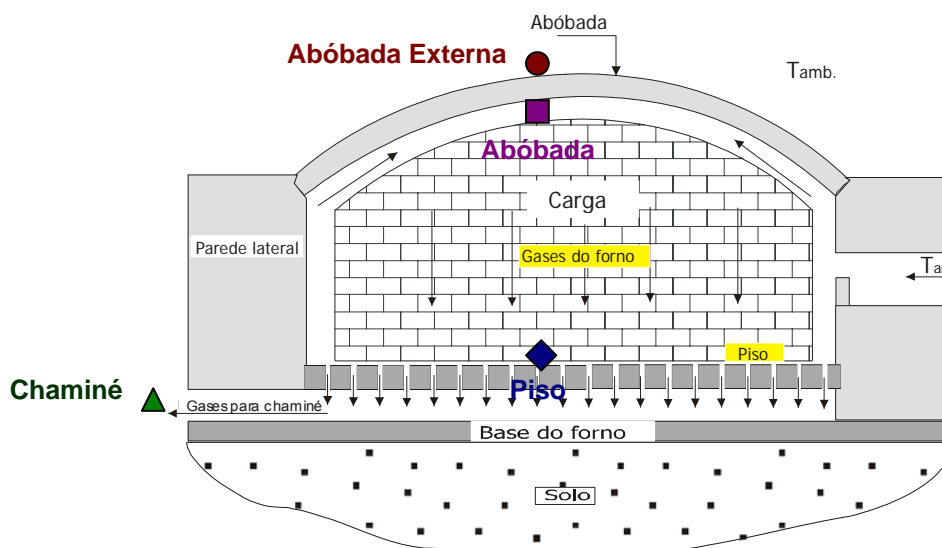


Figura 34 – Indicação dos pontos analisados.

A curva de queima apresenta três regiões distintas, sendo elas: a fase de pré-aquecimento, que compreende aproximadamente as 20 primeiras horas; a fase de queima, onde é realizada a glasura, identificada pelo patamar da curva; e o resfriamento, que se inicia ao fim do patamar e se estende até o fim do processo. O pré-aquecimento, fase 1, pode ser dividido em duas etapas: a etapa utilizando lenha como combustível, quando é feita a secagem final do material, correspondendo às primeiras 15 horas; e a etapa conduzida com óleo combustível, que representa a região onde o aumento de temperatura é mais elevado. Pode-se notar um forte gradiente de temperatura entre a abóbada e o piso do forno, principalmente na etapa de pré-aquecimento. Este fenômeno é gerador de um dos maiores problemas apresentados em fornos intermitentes, consistindo em uma grande variação dimensional do produto final.

Como se trata de um forno de chama invertida, com o escoamento dos gases de cima para baixo, a região superior do forno é aquecida antes da região próxima ao piso. Da mesma forma o material da região superior é o primeiro a ser seco. Sendo assim, o mecanismo de funcionamento do forno faz com que a umidade relativa do ar aumente ao passar pela parte superior do forno, e ao entrar em contato com a região inferior, ainda fria, perca energia, baixando o ponto de saturação do ar, forçando a condensação da água nas superfícies das peças presentes próximas ao piso do forno. A presença de água na base do forno atrasa o aquecimento local e desta forma este fenômeno amplifica os gradientes verticais de temperatura.

A etapa de pré-aquecimento é a preparação do material para a queima, sendo que esta confere as propriedades do produto final. Para a queima do produto, é estabelecida uma temperatura de sinterização e um tempo de permanência. Um pré-aquecimento desigual torna impossível que todas as peças permaneçam à temperatura desejada durante

o mesmo intervalo de tempo, provocando a existência de peças cruas, impróprias para glasura, ou peças sobre-queimadas, ao final do processo.

Este resultado comprova o problema da grande variação na qualidade dos produtos, relatado pelo empresário, conforme é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das lajotas produzidas utilizando óleo BPF.

	Quantidade [Pç]	Massa [kg]	Preço de venda [R\$/pç]	Preço de Venda [R\$]
<b>Lajotas</b>				
Primeira	5.060	8.602	0,36	1.821,60
Primeira Mg	1.056	1.795	0,30	316,80
Comercial	1.947	3.310	0,26	506,22
Comercial Mg	616	1.047	0,20	123,20
Refugo	539	916	0,09	48,51
Quebra Lajota	935	1.590	0,00	0,00
Total da Fornada	10.153	17.260		2.816,33

A título comparativo, tornando o processo ideal, sem quebras e obtendo somente produtos de primeira linha, seriam fabricados 17.260,10 kg de peças de primeira linha. Entretanto o processo atual produz apenas 8.602,00 kg, o que representa um pouco mais de 49% do total produzido. Sendo assim, quase metade da energia é gasta para a fabricação de produtos com muito baixo ou nenhum valor de comercialização.

#### 5.1.1 Consumo de combustível

Como o objetivo do trabalho também visa o aumento da eficiência energética do processo, foi medido o consumo de combustível utilizado para a fabricação desta gama de produtos definidos pelo empresário. A tabela 2 apresenta a medição do consumo de lenha e óleo, bem como sua representação energética, além da eficiência obtida na primeira bateria de medições.

Tabela 5 – Consumo energético do forno estudado utilizando óleo BPF.

Consumo de lenha [m <sup>3</sup> ]	10,00
Consumo de óleo [m <sup>3</sup> ]	3,29
Consumo energético [kJ]*	1,714 10 <sup>8</sup>
Consumo específico [kJ/kg]**	9.002,90
<b>Consumo específico [kcal/kg]</b>	<b>2.143,50</b>

\* PCI (Lenha) = 7.703 kJ/kg, massa específica (Lenha) = 776,26 kg/m<sup>3</sup>,

PCI (Óleo combustível) = 33.496 kJ/kg, massa específica (Óleo) = 1.013,00 kg/m<sup>3</sup>

\*\* A eficiência energética é definida como a razão entre o consumo energético e a massa de material já queimado.

## 5.2 Resultados de simulação numérica

Buscando a validação do modelo matemático desenvolvido, apresentado no capítulo 4, foram comparadas as curvas obtidas experimentalmente e pelo programa de simulação. O resultado está apresentado na figura 35, onde são comparados os valores das temperaturas de pontos da abóbada e do piso do forno.

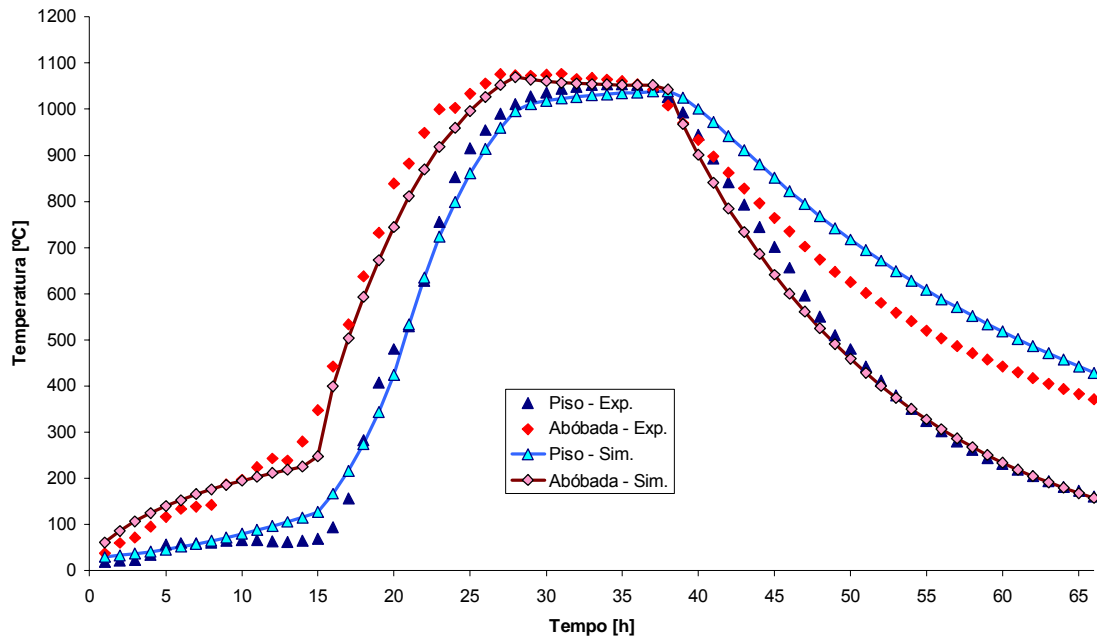


Figura 35 – Comparação entre as temperaturas medidas e teóricas para o piso e a abóbada.

A boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais demonstra que o modelo matemático é consistente, durante o aquecimento e a queima, permitindo a identificação de outros parâmetros importantes para a compreensão do problema. Estes outros parâmetros são de difícil obtenção experimental. Durante o resfriamento há uma certa discrepância, prevendo-se que a abóbada seria resfriada rapidamente, antes do piso. Na prática há uma inversão no sentido do transporte da energia térmica, pois todas as aberturas do forno são fechadas, incluindo a chaminé. O resfriamento passa a ocorrer por convecção e radiação das paredes e abóbada para o ambiente. Internamente, por convecção natural, o ar quente sobe para a abóbada, sendo esta a última a ser resfriada. A discrepância apresentada não representa um problema, pois todo o cálculo que interessa dos pontos de vista da queima e energéticos podem ser encerrados no momento de corte da alimentação de combustível.



### 5.2.1 Análise de perdas

A figura 36 mostra o gráfico de perdas do processo ao longo do tempo. A curva 1 representa o somatório das perdas para o ambiente e a curva 2, a energia despendida para o aquecimento dos componentes do sistema, como a estrutura do forno e a carga de material. A energia requerida para aquecer a carga de material e os componentes do forno é considerada como uma perda devido à natureza descontínua do processo ao longo do tempo, já que toda essa energia despendida não é reaproveitada. A curva 3 representa o somatório da energia armazenada nos gases que deixam o forno pela chaminé.

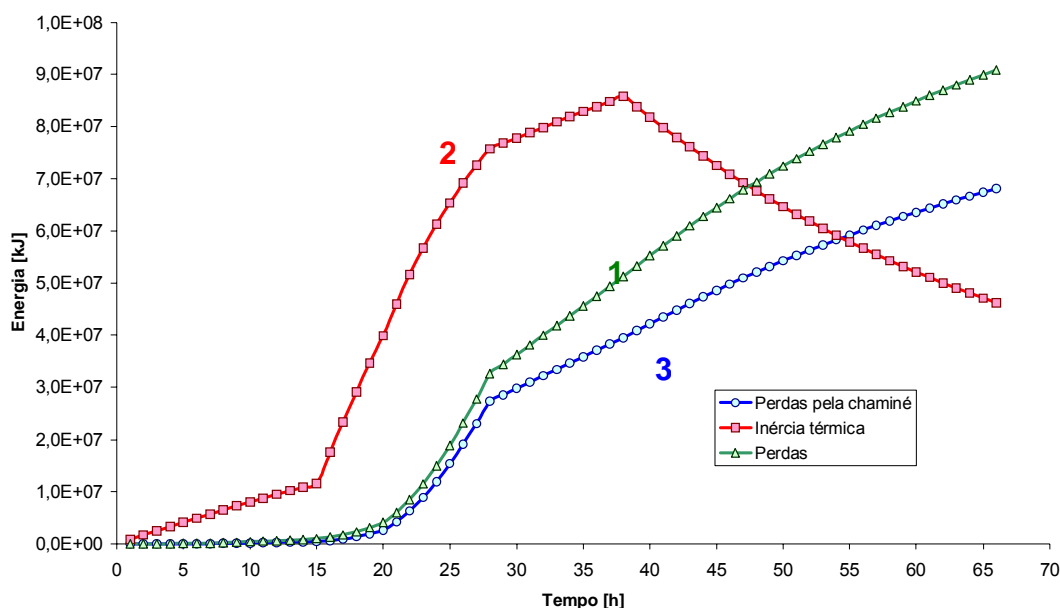


Figura 36 – Destinação da energia utilizada na queima segundo a simulação.

Para melhor análise das perdas energéticas presentes no forno em questão, foi criada uma metodologia de cálculo, para a quantificação e discriminação de cada parcela de energia perdida. Este método determina que o cálculo deve ser feito no momento em que termina a queima, antes do início do resfriamento. Desta forma pode-se separar a energia gasta para aquecer a carga e a estrutura do forno, da parcela perdida para o ambiente que atravessa a fronteira do domínio. A tabela 6 apresenta a energia gasta no processo, de forma discriminada.

### 5.3 Isolamento do forno

As perdas de energia através das paredes do forno se mostraram muito representativas, requerendo um melhor isolamento térmico, principalmente em virtude da utilização do gás natural, que possui um custo superior aos combustíveis convencionais. Sendo assim foi proposto que fosse investido na melhoria do isolamento, tanto da abóbada, quanto das paredes laterais.

Tabela 6 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima.

Parcela de energia	Energia [J]	Percentual [%]
Perdas por radiação na abóbada	3,48E+09	2,60
Perdas por convecção na abóbada	6,37E+09	4,75
Perdas por radiação na superfície externa da parede	3,87E+08	0,29
Perdas por convecção na superfície externa da parede	5,55E+08	0,41
Perdas por condução na superfície externa da parede	1,99E+07	0,01
Perdas por condução da base para o solo	2,47E+08	0,18
Perdas pela chaminé	3,83E+10	28,55
<b>Total de perdas</b>	<b>4,94E+10</b>	<b>36,79</b>
Aquecimento da carga	5,10E+10	38,00
Aquecimento dos gases do forno	1,10E+08	0,08
Aquecimento da abóbada do forno	6,01E+09	4,48
Aquecimento da parede lateral	1,05E+10	7,84
Aquecimento do piso	5,95E+09	4,43
Aquecimento dos gases do piso	6,01E+06	0,00
Aquecimento da base	1,12E+10	8,37
Aquecimento dos gases da base	6,68E+06	0,00
<b>Total para aquecimento do forno</b>	<b>8,48E+10</b>	<b>63,21</b>
<b>Produção de energia com a queima do combustível</b>	<b>1,34E+11</b>	<b>100,00</b>

### 5.3.1 Isolamento da abóbada

Este isolamento mereceu atenção especial por ser o de mais fácil aplicação. Primeiramente optou-se por colocar uma camada de cinza de casca de arroz sobre a abóbada, sendo contida por paredes de proteção, a maior delas com o diâmetro externo da abóbada e uma intermediária, com metade desse diâmetro. Vale lembrar que a abóbada é curva e os degraus feitos por essas paredes visam manter o volume de cinzas apenas de acordo com o necessário. Pelo inconveniente do manuseio da cinza solta, pensou-se em fazer uma argamassa contendo a própria cinza, areia fina e ainda argila como ligante. Foram feitas algumas amostras em diversas proporções e o limite de aglutinação foi encontrado como o da proporção de 8 partes de cinzas, 1 parte de areia e 1 parte de argila (tabela 7). A colocação de cinza adicional tornava a amostra muito frágil. As amostras fabricadas e a cinza solta, a granel, foram ensaiadas em um equipamento desenvolvido no LMPT-EMC-UFSC, com a finalidade de determinar a condutividade térmica e também o calor específico.

Tabela 7 – Propriedades da cinza de casca de arroz – amostras de 10 x 10 cm.

	Proporção	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutividade Térmica [W/mK]	Calor Específico [J/kgK]
Cinza solta		380	0,07	300
Cinza+argila+areia	8:1:1	660	0,19	250
Cinza+argila+areia	6:1:1	870	0,23	270

Os resultados da tabela 7 mostram que existe uma grande diferença entre as amostras sólidas e a cinza solta. A cinza é mais leve, com aproximadamente a metade do peso para o mesmo volume. A condutividade térmica fica em torno de 37 % do valor apresentado pela amostra sólida de 8:1:1. Examinando-se o calor específico pode-se ter uma surpresa, à primeira vista, por ser superior no caso da cinza solta. Entretanto se for escolhida uma camada de isolante de 1 m<sup>2</sup> de área e 10 cm de altura, será necessário uma quantidade de calor igual a 11,7 kJ para o caso da cinza solta, e de 17,8 kJ para a amostra sólida mais leve, para elevar a temperatura de 1°C. Logicamente o parâmetro mais importante aqui seria a capacidade calorífica dada pelo produto: densidade x calor específico x volume. Assim os resultados recomendam o uso da cinza a granel, colocada diretamente sobre a abóbada.

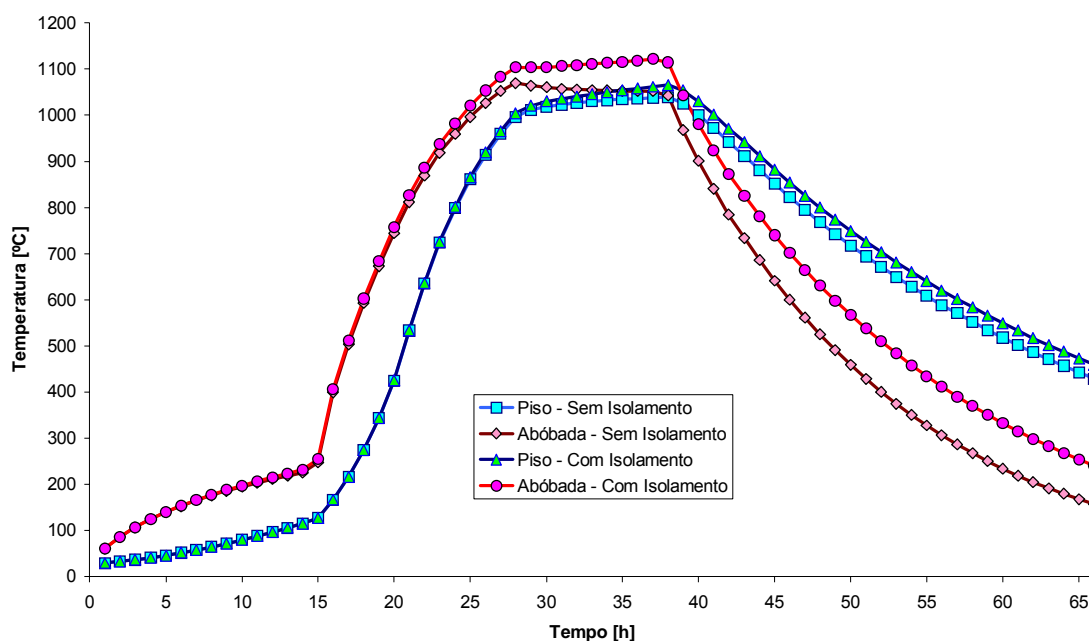


Figura 37 – Comparação entre as temperaturas teóricas do piso e da abóbada do forno, com e sem isolamento da abóbada.

Com a finalidade de avaliar o ganho causado pelo isolamento da abóbada, foi realizada uma simulação, onde foram mantidos todos os parâmetros, inclusive a quantidade de combustível gasto, variando apenas a espessura e a condutividade da abóbada. A figura 37 compara as curvas de queima teóricas do forno com e sem isolamento. Mantendo a mesma quantidade de combustível, observa-se que no caso do forno sem isolamento da abóbada, as temperaturas são inferiores, quando comparadas com o caso de isolamento.

Sendo o principal objetivo promover a redução das perdas, o gráfico apresentado na figura 38 mostra um comparativo das perdas teóricas obtidas no forno com e sem isolamento da abóbada. Analisando as curvas que representam as perdas do forno, pode-se observar uma pequena redução, em relação aos valores obtidos com o forno sem isolamento.

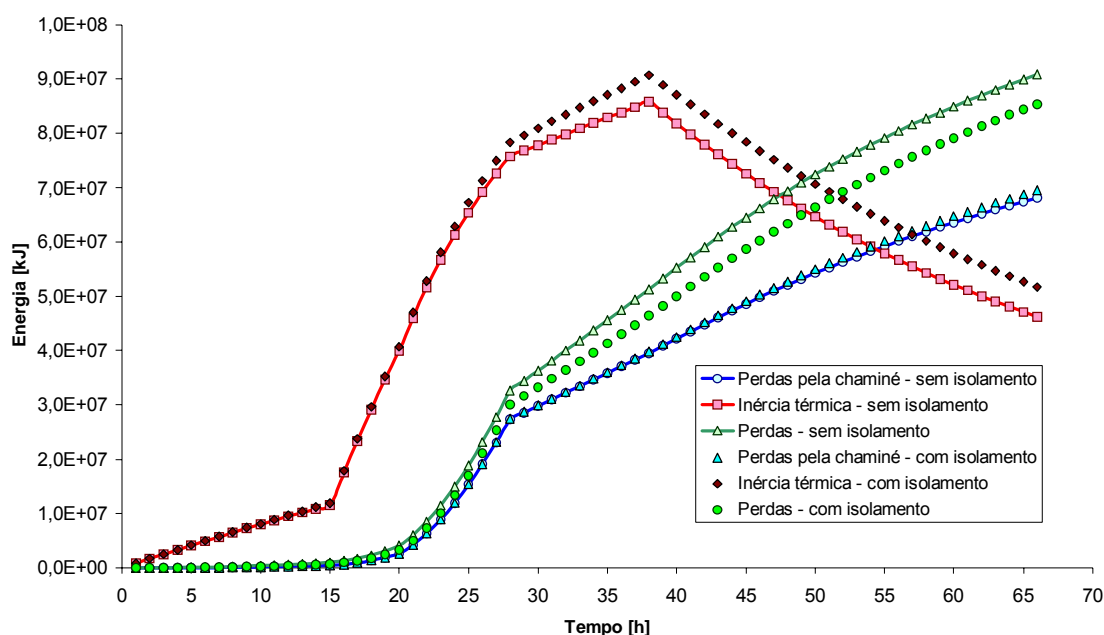


Figura 38 – Destinação da energia utilizada na queima, segundo a simulação.

O isolamento da abóbada também refletiu diretamente na inércia térmica do forno, proporcionando uma redução da energia gasta para aquecer a carga. Com a redução das perdas para o ambiente, e teoricamente sem a redução da energia fornecida ao sistema, a energia excedente se acumula na carga, aquecendo-a, refletindo na inércia térmica do forno.

Tabela 8 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima, com o forno isolado na abóbada, usando lenha e óleo BPF.

Parcela de energia	Energia [J]	Percentual [%]
Perdas por radiação na abóbada	1,55E+09	1,2
Perdas por convecção na abóbada	3,64E+09	2,8
Perdas por radiação na superfície externa da parede	2,35E+08	0,2
Perdas por convecção na superfície externa da parede	3,72E+08	0,3
Perdas por condução na superfície externa da parede	2,00E+07	0,0
Perdas por condução da base para o solo	2,48E+08	0,2
Perdas pela chaminé	3,83E+10	29,4
<b>Total de perdas</b>	<b>4,44E+10</b>	<b>34,0</b>
Aquecimento da carga	5,03E+10	38,5
Aquecimento dos gases do forno	1,09E+08	0,1
Aquecimento da abóbada do forno	7,68E+09	5,9
Aquecimento da parede lateral	1,09E+10	8,4
Aquecimento do piso	5,87E+09	4,5
Aquecimento dos gases do piso	5,91E+06	0,0
Aquecimento da base	1,12E+10	8,6
Aquecimento dos gases da base	6,59E+06	0,0
<b>Total para aquecimento do forno</b>	<b>8,62E+10</b>	<b>66,0</b>
<b>Produção de energia com a queima do combustível</b>	<b>1,31E+11</b>	<b>100,0</b>

As parcelas de perdas e também as relativas à inércia térmica dos componentes estão listadas na tabela 8, onde se observa uma redução substancial nas quantidades perdidas pela abóbada, quando comparada com os valores da tabela 7.

#### 5.4 Simulação do forno utilizando o gás natural

Como um dos objetivos do trabalho é a conversão do forno para o uso do gás natural, esta situação foi simulada utilizando o modelo matemático, com o intuito de prever seu comportamento com o novo energético. Para isso todos os parâmetros foram mantidos, com exceção do combustível, passando de óleo para gás natural, bem como a vazão de ar requerida para a sua combustão. As curvas de queima, referentes aos pontos situados no centro do piso e da abóbada, estão apresentadas na Fig. 39.

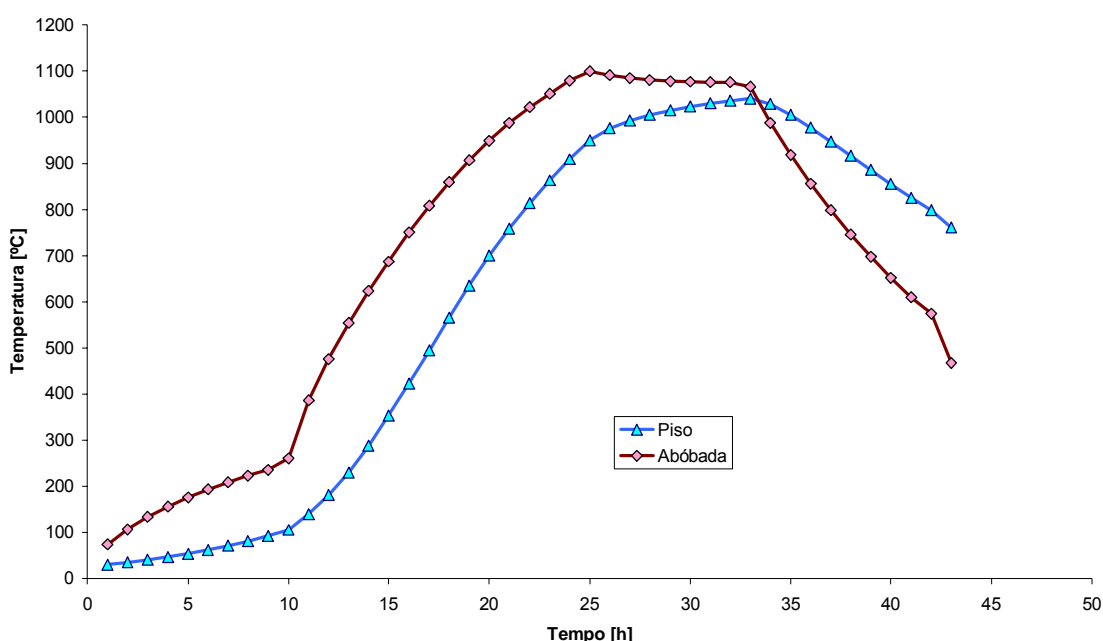


Figura 39 – Curvas de queima teóricas para o piso e para a abóbada.

Com base nos dados obtidos pela simulação é esperada uma redução no gradiente vertical de temperatura. Tal ganho é explicado pelo aumento de vazão volumétrica de ar quente no interior do forno, pois o gás natural requer maior quantidade de ar para a sua combustão.

##### 5.4.1 Análise de perdas

De acordo com os resultados teóricos, na queima com gás natural houve uma redução no consumo total de energia em 11% (ver tabelas 8 e 9). As principais diferenças

aparecem nas perdas pela chaminé e no aquecimento da carga, proporcionadas, principalmente, pelo melhor controle da queima do combustível.

Tabela 9 – Parcelas despendidas durante a queima, com o forno isolado, utilizando GN.

Parcela de energia	Energia [J]	Percentual [%]
Perdas por radiação na abóbada	3,52E+09	3,00
Perdas por convecção na abóbada	6,39E+09	5,44
Perdas por radiação na superfície externa da parede	3,84E+08	0,33
Perdas por convecção na superfície externa da parede	5,49E+08	0,47
Perdas por condução na superfície externa da parede	1,56E+07	0,01
Perdas por condução da base para o solo	2,03E+08	0,17
Perdas pela chaminé	2,25E+10	19,13
<b>Total de perdas</b>	<b>3,35E+10</b>	<b>28,55</b>
Aquecimento da carga	5,16E+10	43,94
Aquecimento dos gases do forno	1,10E+08	0,09
Aquecimento da abóbada do forno	6,12E+09	5,21
Aquecimento da parede lateral	1,00E+10	8,55
Aquecimento do piso	5,92E+09	5,04
Aquecimento dos gases do piso	5,92E+06	0,01
Aquecimento da base	1,01E+10	8,61
Aquecimento dos gases da base	6,48E+06	0,01
<b>Total para aquecimento do forno</b>	<b>8,39E+10</b>	<b>71,45</b>
<b>Produção de energia com a queima do combustível</b>	<b>1,17E+11</b>	<b>100,00</b>

### 5.5 Resultados experimentais utilizando o sistema de gás natural

Um cálculo estequiométrico nos permite estimar, a priori, a vazão necessária de ar para atender a potência de queima requerida e com isso dimensionar os ventiladores do ar de combustão.

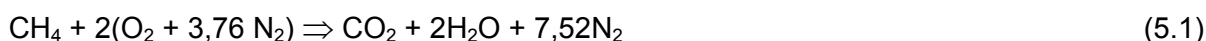
Para este cálculo foram feitas as seguintes considerações:

Ar atmosférico  $\cong$  21% de  $O_2$ , 79% de  $N_2$ .

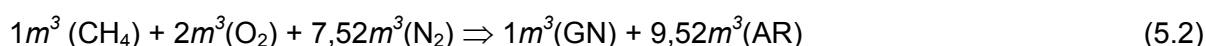
Proporção  $N_2/O_2$ : 3,76.

Para simplificação de cálculo foi considerada a composição do gás natural como sendo 100% de  $CH_4$ .

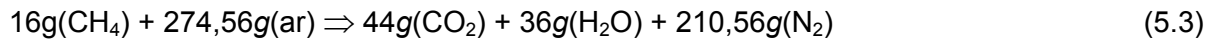
Para a queima estequiométrica do metano tem-se a seguinte equação:



Esta mesma equação, em volume, pode ser dada por:



Em massa, tem-se:



Ou ainda:



Para o óleo BPF:

Fração mássica de carbono ( $F_mC$ ) = 0,83;

Fração mássica de hidrogênio ( $F_mH$ ) = 0,10;

Fração mássica de enxofre ( $F_mS$ ) = 0,06;

Massa específica ( $\rho$ ) = 1013kg/m<sup>3</sup>.

Deste modo o volume de ar de combustão ( $Var_{combust}$ ), em função da massa de combustível queimada ( $m_{comb}$ ), pode ser estimado por:

$$Var_{combust} = \{(22,4/0,21)*[(0,83/12) + (0,10/4) + (0,06/32)]\} * m_{comb} \quad (5.5)$$

Em volume, tem-se para o óleo BPF:



Em massa, tem-se:



Assim, em comparação entre o GN e o óleo BPF, usando-se a quantidade de massa de ar necessária para a queima de 1kg de combustível:

$$\frac{(17,16 - 12,97)}{12,97} * 100\% = 32,5\%. \quad (5.8)$$

A relação acima indica a quantidade (em massa) de ar que deve ser aumentada para a queima de GN, em relação ao óleo BPF, para uma queima com reação estequiométrica. Porém a queima de 1 kg de GN produz 49.879 kJ de energia e a reação com óleo combustível resulta em 39.777 kJ.

#### 5.5.1 Análise da composição química dos gases

Durante a conversão do forno, após a instalação do sistema de queima do gás natural, foram realizadas análises dos gases com a finalidade de regular o sistema de queima do gás natural. A tabela 10 apresenta a composição química do gás analisado.

A análise dos gases do forno foi realizada no canal de tiragem, antes da janela para a entrada de ar falso na chaminé. São medidas indicativas do funcionamento geral da queima, tendo em vista que o local de extração dos gases permite a entrada de ar externo. Mas a quantidade de CO mostrou uma queima bastante ineficiente, indicando falta de ar

para uma queima mais eficiente. Com o aumento da vazão de ar e aumento da temperatura, a eficiência da queima melhorou, conforme os dados apresentados na tabela 10. Mesmo indicativas, estas leituras foram de muita utilidade para a solução imediata dos problemas que ocorreram durante a queima. Pela medição de nº 8, os índices de NO e NO<sub>x</sub> estão altos e são indicativos de que a queima está mais eficiente.

Tabela 10 – Composição química dos gases medida durante a regulagem do sistema de queima do gás natural.

DATA	06/08	06/08	06/08	06/08	06/08	07/08	07/08	07/08	07/08
HORÁRIO	16:07	16:23	18:16	22:14	23:02	13:37	13:47	14:32	14:58
MEDIÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
O <sub>2</sub> [%]	18,8	18,9	18,3	10,4	10,9	10,2	7,5	7,4	9,7
CO [mg/m <sup>3</sup> ]	215	245	485	479	383	56	5	1	0
CO <sub>2</sub> [%]	1,1	1,1	1,4	5,9	5,7	6,0	7,6	7,6	6,3
CO/CO <sub>2</sub>	0,0156	0,0178	0,0277	6,4E-3	5,7E-3	7E-4	0	0	0
NO [mg/m <sup>3</sup> ]	8	7	8	11	11	62	78	102	71
NO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	8	7	8	11	11	62	78	102	71
SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	14	14	20	17	14	3	0	0	0
T <sub>flue</sub> [°C]	45,8	45,9	46,8	66,3	70,5	429,9	427,5	454,0	461,8
T <sub>amb</sub> [°C]	24	23	19,1	17,6	19,2	24,7	24,2	23,4	23,4

Com o forno convertido e passando a utilizar gás natural como combustível, foi realizada uma nova medição em campo. Para a primeira medição foi mantida a mesma curva de queima, agora programada antecipadamente, permitida pelo sistema de queima do gás natural, deixando de depender do operador do forno. A figura 40 compara os resultados experimentais com os resultados teóricos.

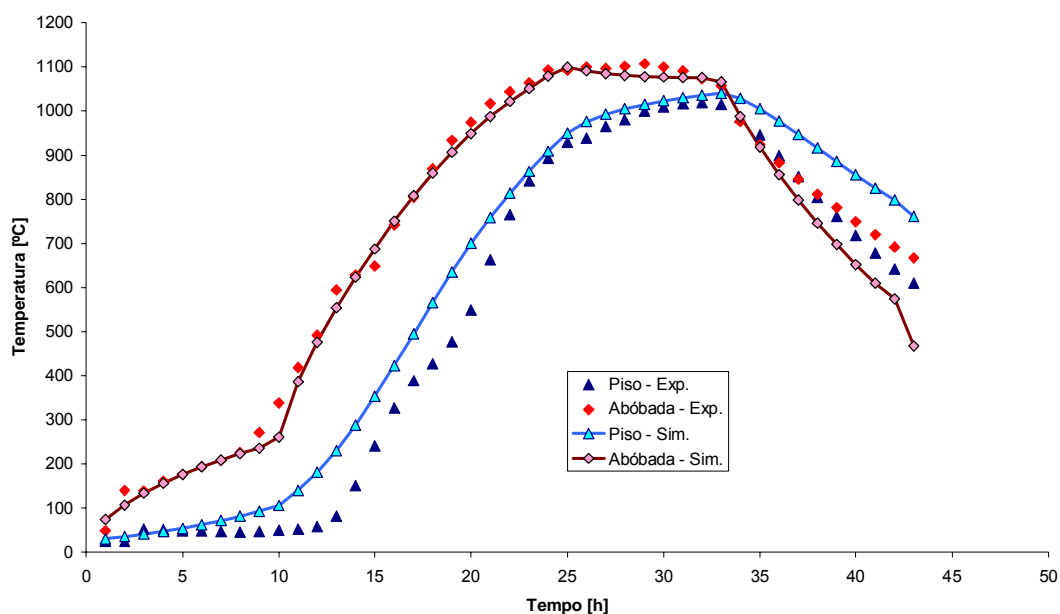


Figura 40 – Comparação entre as temperaturas medidas e teóricas para o piso e a abóbada; simulação sem as reações.



Comparando os resultados da abóbada, a curva teórica apresentou ótima concordância com a curva obtida experimentalmente, desde o aquecimento até o resfriamento. Os resultados para o piso, porém, tiveram uma pequena divergência. Os valores teóricos se mantiveram sempre acima dos experimentais e assim a redução no gradiente de temperatura não foi alcançada.

A partir dos resultados apresentados, pode-se notar que o modelo matemático representa bem o comportamento do forno, principalmente nas regiões próximas à abóbada. A pouca concordância dos valores próxima ao piso se deve a desconsideração das reações na modelagem matemática, porém presentes no processo de sinterização da argila.

Na 12ª hora de processo encontra-se o ponto máximo do gradiente de temperatura entre o piso e o teto, depois tende a se reduzir, aumentando novamente em torno de 17 horas. Observando ainda a figura. 40, nota-se que até a décima segunda hora, a temperatura do piso é inferior a 100°C. Este comportamento é causado pela umidade residual do material, que devido ao funcionamento do forno, tende a se acumular na parte inferior do mesmo. O segundo aumento do gradiente de temperatura acontece na faixa de temperatura onde ocorre a desidroxilação de vários componentes presentes na argila, como a caulinita.

A tabela 11 mostra a classificação das lajotas fabricadas com o uso do gás natural como combustível.

Tabela 11 – Classificação das lajotas produzidas utilizando GN na 1ª medição.

	Quantidade [Pç]	Massa [kg]	Preço de Venda [R\$/pç]	Preço de Venda [R\$]
<b>Lajotas</b>				
Primeira	4.477	7.611	0,36	1.611,72
Primeira Mg	1.111	1.889	0,30	333,30
Comercial	1.958	3.329	0,26	509,08
Comercial Mg	605	1.028	0,20	121,00
Refugo	803	1.365	0,09	72,27
Quebra Lajota	888	1.510	0,00	0,00
<b>Total da Fornada</b>	<b>9.842</b>	<b>16.731</b>		<b>2.647,37</b>

Os valores de consumo de combustível, bem como a eficiência energética obtida na primeira medição utilizando gás natural, estão apresentados na tab. 12.

Tabela 12 – Consumo energético do forno estudado utilizando GN na 1ª medição.

Consumo Gás Natural [Nm <sup>3</sup> ]	3.898,87
Consumo energético [kJ]*	1,382. 10 <sup>8</sup>
Consumo específico [kJ/kg]	7.662
<b>Consumo específico [kcal/kg]</b>	<b>1.830</b>

\* PCI (GN) = 49.879 kJ/kg,

## 5.6 Reações presentes no processo

Em busca de melhores resultados teóricos, algumas reações presentes no processo foram adicionadas ao modelo matemático. Desta forma os balanços passam a contar com mais um termo. Sendo as reações de natureza endotérmica, o novo termo representa um sumidouro de energia na equação.

Para a implementação das reações no programa computacional, foi empregada uma nova subrotina, denominada reações. Tal subrotina é chamada quando o elemento de carga atinge uma temperatura determinada, cessando ao completar a reação total ou atingir uma temperatura onde não ocorrem mais reações. Para a evaporação da água residual, a temperatura inicial de reação foi definida como 50°C e a final como 200°C. Para a desidroxilação da caulinita, o início das reações acontece em 450°C e cessa a 600°C. Estes intervalos de temperatura onde ocorrem as reações foram determinados com base na análise térmica diferencial/gravimétrica, obtida nos ensaios apresentados no item 3.2.4.

Com a nova subrotina implementada, foi realizada uma simulação a fim de verificar os resultados.

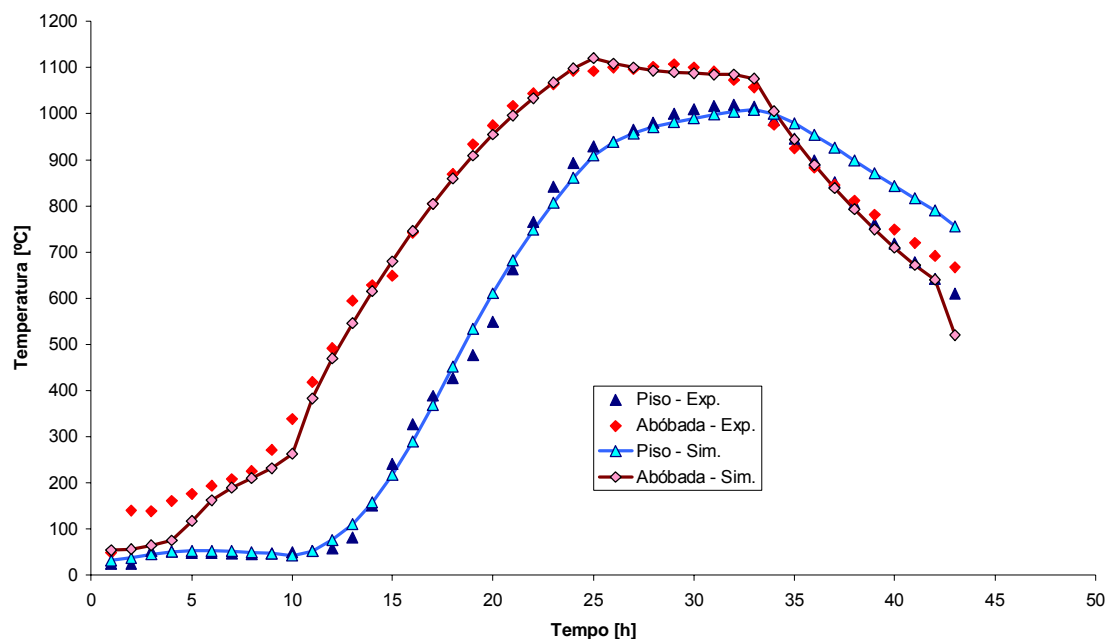


Figura 41 – Comparação entre as temperaturas medidas e teóricas para o piso e a abóbada; simulação com as reações.

A figura 41 compara os valores obtidos teoricamente a partir do programa de simulação, já contemplando as reações de evaporação da água residual e de desidroxilação da caulinita, com os resultados experimentais. A energia consumida pelas reações promoveu um retardo no aquecimento da carga, fato que ficou mais evidenciado nos elementos próximos ao piso do forno. Portanto, comparando com os dados experimentais,

os resultados obtiveram maior concordância, representando de forma mais fiel o processo de aquecimento do material.

### 5.6.1 Análise de Perdas

Em uma avaliação das perdas no processo contemplando as reações de evaporação da água e de desidroxilação da caulinita, fica explícito que o acréscimo deste novo mecanismo implica em um maior consumo de energia, porém com pouca significância. Segundo a tabela 13, a perda devida às reações representa 0,32% de toda energia despendida no processo.

Tabela 13 – Parcelas de energia despendidas no forno durante a queima, com o forno isolado, com gás natural e considerando as reações na carga.

Parcela de energia	Energia [J]	Percentual [%]
Perdas por radiação na abóbada	3,52E+09	2,99
Perdas por convecção na abóbada	6,39E+09	5,42
Perdas por radiação na superfície externa da parede	3,84E+08	0,33
Perdas por convecção na superfície externa da parede	5,49E+08	0,47
Perdas por condução na superfície externa da parede	1,56E+07	0,01
Perdas por condução da base para o solo	2,03E+08	0,17
Perdas devido às reações	3,81E+08	0,32
Perdas pela chaminé	2,25E+10	19,07
<b>Total de perdas</b>	<b>3,39E+10</b>	<b>28,78</b>
Aquecimento da carga	5,16E+10	43,80
Aquecimento dos gases do forno	1,10E+08	0,09
Aquecimento da abóbada do forno	6,12E+09	5,19
Aquecimento da parede lateral	1,00E+10	8,53
Aquecimento do piso	5,92E+09	5,02
Aquecimento dos gases do piso	5,92E+06	0,01
Aquecimento da base	1,01E+10	8,58
Aquecimento dos gases da base	6,48E+06	0,01
<b>Total para aquecimento do forno</b>	<b>8,39E+10</b>	<b>71,22</b>
<b>Produção de energia com a queima do combustível</b>	<b>1,18E+11</b>	<b>100,00</b>

Para as medições seguintes, as curvas de queima foram ajustadas para um tempo reduzido, a fim de verificar a resistência do material à rápidas variações de temperaturas. Para a segunda medição, o aquecimento foi programado com uma inclinação constante, partindo da temperatura ambiente e atingindo a temperatura de glasura – 1.100°C – ao final de 18 horas. O patamar de temperatura, para a etapa de glasura, foi mantido durante 12 horas. A figura 42 apresenta as curvas programada e obtidas durante a segunda medição. A aceleração do processo ocasionou um aumento no gradiente de temperatura no interior do forno. Tal fato permitiu que algumas peças não sofressem o processo de glasura, refletindo diretamente na qualidade final deste lote de produtos.

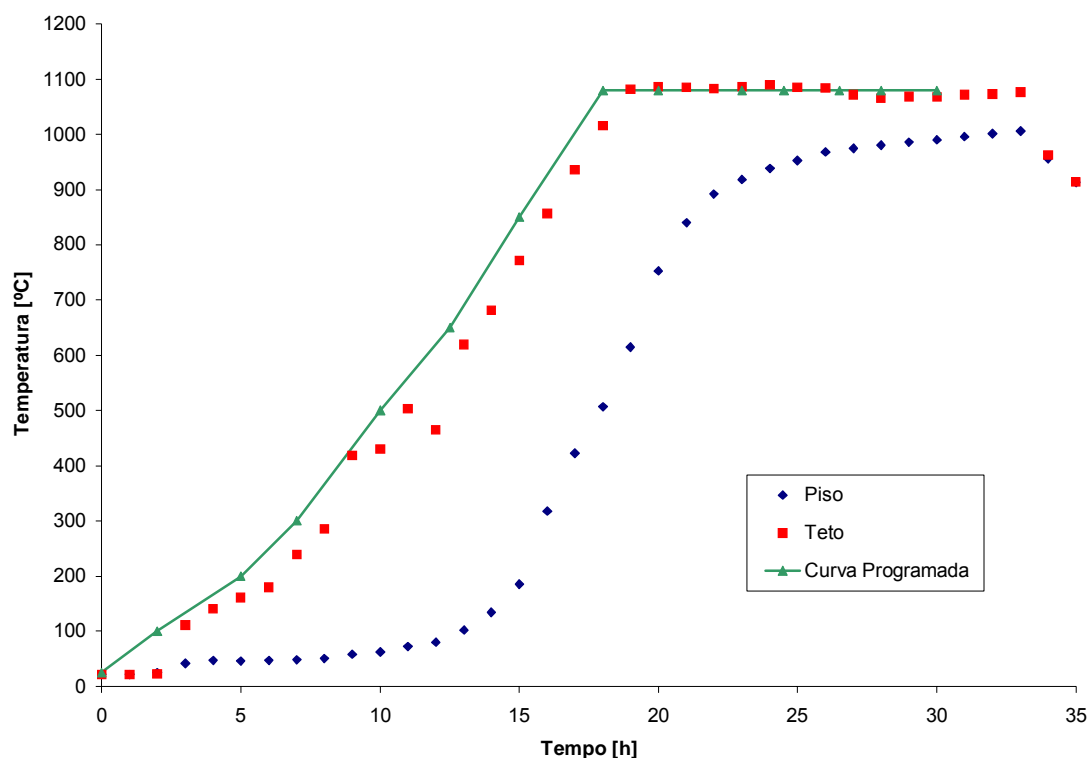


Figura 42 – Curva programada e medida durante a 2ª medição.

A tabela 14 mostra a classificação das lajotas fabricadas com o uso do gás natural como combustível, na 2ª medição.

Tabela 14 – Classificação das lajotas produzidas utilizando GN na 2ª medição.

	Quantidade [Pç]	Massa [kg]	Preço de Venda [R\$/pç]	Preço de Venda [R\$]
<b>Lajotas</b>				
Primeira	3.454	5.872	0,36	1.243,44
Primeira Mg	2.342	3.981	0,30	702,60
Comercial	1.166	1.982	0,26	303,16
Comercial Mg	1.254	2.132	0,20	250,80
Refugo	968	1.646	0,09	87,12
Quebra Lajota	568	966	0,00	0,00
Total da Fornada	9.752	16.578		2.587,12

Os valores de consumo de combustível, bem como a eficiência energética obtida na primeira medição utilizando gás natural, estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Consumo energético do forno estudado utilizando GN na 2ª medição.

Consumo Gás Natural [Nm <sup>3</sup> ]	3.364
Consumo energético [kJ]	1,289. 10 <sup>8</sup>
Consumo específico [kJ/kg]	7.214
<b>Consumo específico [kcal/kg]</b>	<b>1.723</b>

Em busca de uma redução no consumo de energia, o aquecimento da curva programada para a terceira medição teve a duração de 15,5 horas, a uma taxa constante. Porém foram mantidas as 12 horas de duração do patamar para a etapa de glasura, tendo em vista que a aceleração do aquecimento prejudica a qualidade do produto, fato que seria acentuado com a redução do patamar. A figura 43 mostra as curvas programadas e obtidas durante a terceira medição.

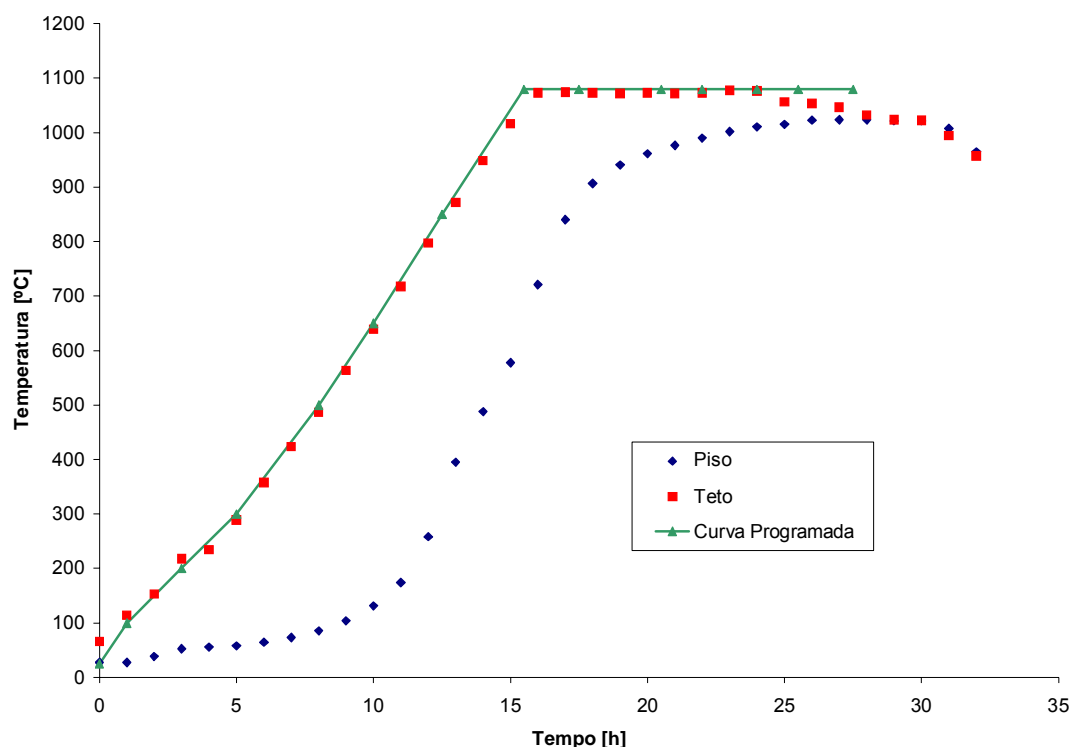


Figura 43 – Curva programada e medida durante a 3ª medição.

Tabela 16 – Classificação das lajotas produzidas utilizando GN na 3ª medição.

	Quantidade [Pç]	Massa [kg]	Preço de Venda [R\$/pç]	Preço de Venda [R\$]
<b>Lajotas</b>				
Primeira	3.212	5.460	0,36	1.156,32
Primeira Mg	2.112	3.590	0,30	633,60
Comercial	1.287	2.188	0,26	334,62
Comercial Mg	1.463	2.487	0,20	292,60
Refugo	968	1.646	0,09	87,12
Quebra Lajota	650	1.105	0,00	0,00
<b>Total da Fornada</b>	<b>9.692</b>	<b>16.476</b>		<b>2.504,26</b>

A tabela 16 mostra a classificação das lajotas fabricadas com o uso do gás natural como combustível, na terceira queima

Os valores de consumo de combustível, bem como a eficiência energética obtida na terceira medição, utilizando gás natural, estão apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Consumo energético do forno estudado utilizando GN na 3ª medição.

Consumo Gás Natural [Nm <sup>3</sup> ]	3.340
Consumo energético [kJ]	1,061. 10 <sup>8</sup>
Consumo específico [kJ/kg]	7.011
<b>Consumo específico [kcal/kg]</b>	<b>1.674</b>

A figura 44 compara as curvas de queima medidas junto ao teto do forno utilizando óleo BPF e as três medições realizadas com gás natural. Podemos observar uma redução no tempo de queima. Tal redução mostrou que a argila suporta uma taxa de aquecimento superior a que vinha sendo empregada, resultando em maior produtividade e menor consumo de energia, porém aumentando o número de peças com glasura incompleta (redução no número de primeiras, com aumento do número de comerciais).

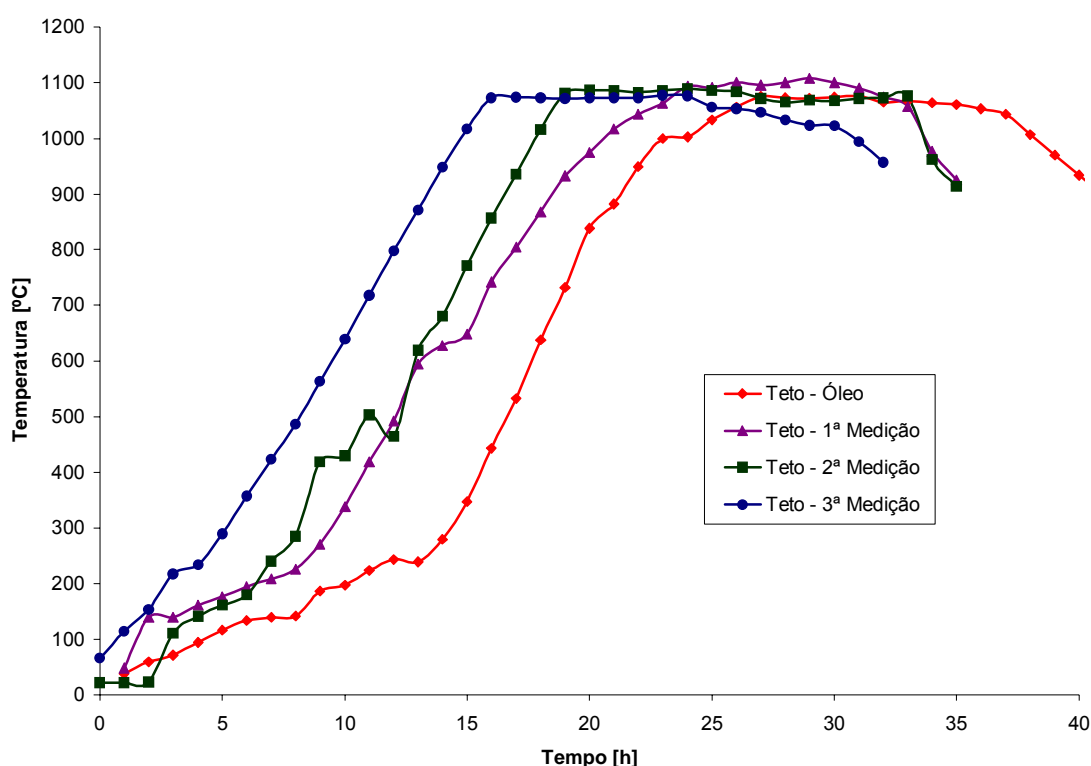


Figura 44– Curvas de queima para o teto do forno, obtidas com óleo e GN.

A tabela 18 compara a eficiência energética média e o ganho específico – por kg de material queimado - obtidos com gás natural e com o óleo combustível. A partir desses parâmetros é possível avaliar a evolução energética do processo e o seu conseqüente prejuízo causado pela redução da qualidade do produto. Avaliando os valores apresentados na tabela, o uso do gás natural proporciona uma redução de 18,7%, porém uma redução na receita da empresa de 4,8%, por fornada. Todavia a comparação destes dois parâmetros isoladamente, não determina qual processo é mais vantajoso.

Tabela 18 – Consumo específico/ganho específico por fornada, com óleo BPF ou GN.

	Óleo BPF	GN
Consumo específico [kcal/kg]	2.144	1.742
Ganho específico [R\$/kg]	0,1632	0,1554

Para avaliar as vantagens econômicas do uso do gás natural, em um processo de queima acelerado, foi utilizado um parâmetro que relaciona a energia gasta por unidade monetária, no caso o Real, obtida com a receita de venda dos produtos. A tabela 19 compara este parâmetro obtido com o ciclo normal utilizando óleo e o ciclo reduzido com GN.

Tabela 19 – Consumo específico, com óleo BPF ou GN.

	Óleo BPF	GN
Consumo específico [Mcal/R\$]	13,13	11,21

Para cada real arrecadado com a venda dos produtos, em um ciclo normal com óleo combustível, é necessário gastar 13,13 Mcal, enquanto que em um ciclo reduzido, utilizando gás natural, é consumido apenas 11,21 Mcal, representando uma economia de 14,6%. Sendo que 13,13 Mcal representam 0,00162 m<sup>3</sup> de óleo combustível e 11,21 Mcal, 0,292 m<sup>3</sup> de gás natural.

Tabela 20 – Retorno Financeiro, com óleo BPF ou GN.

	Óleo BPF	GN
Consumo de Combustível [m <sup>3</sup> /R\$arrecadado]	0,00136	1,225
Custo do Combustível* [R\$gasto/m <sup>3</sup> ]	700,00	0,80
Retorno Financeiro [R\$gasto/ R\$arrecadado]	0,955	0,980

\* Valores de janeiro de 2003.

A partir da tabela 20, pode-se concluir que o processo de fabricação tanto com ciclo normal a óleo, ou com ciclo reduzido com gás natural, mostrou-se inviável. Assim, para cada real recebido das vendas, são gastos mais de R\$ 0,95 somente com o combustível, restando ainda todos os custos presentes em qualquer empresa.

### 5.7 Simulação assistida por CFD

Para a análise do comportamento dos gases no interior do forno foi utilizada uma ferramenta de CFD – *Computational Fluid Dynamics*. Devido à disponibilidade de licença optou-se pelo CFX 5.6, um pacote computacional presente no mercado, que se destaca pela sua velocidade, robustez e precisão, utilizado para simulação de transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.

### 5.8 CFX-5

O CFX utiliza o método de volumes finitos (Maliska, 1995) para a discretização das equações governantes do problema de mecânica dos fluidos e transferência de calor (Bejan, 1995). O conjunto de equações que regem esse fenômeno é formado pelas equações da continuidade, da conservação da quantidade de movimento linear e da conservação da energia.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5.9)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = \nabla \cdot \left( -p \delta + \mu \left( \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right) \right) + S_M \quad (5.10)$$

Equação da conservação da energia:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E, \quad (5.11)$$

Onde  $h_{tot}$  é definido como a entalpia total específica, que para um caso geral com propriedades variáveis e escoamento compressível é escrita como:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} u^2 \quad (5.12)$$

Sendo que  $h = h(p, T)$ .

Porém a solução deste conjunto de equações não é possível, tendo em vista que são 7 variáveis (a massa específica, as 3 componentes da velocidade, a temperatura, a pressão e a entalpia) e apenas 5 equações: a equação (5.9), as 3 componentes da equação (5.10) e a equação (5.11). Para que este sistema de equações seja fechado, a equação de estado é adicionada a este conjunto, relacionando massa específica com pressão e temperatura, além da equação constitutiva que relaciona entalpia com pressão e temperatura.



A equação de estado é definida a partir do fluido a ser estudado, no caso o ar. Sendo o ar definido como gás ideal, o programa resolve a seguinte equação:

$$\rho = \frac{w(p + p_{ref})}{R_0 T}, \quad (5.13)$$

Onde  $w$  é o peso molecular do gás e  $R_0$  é a constante universal dos gases.

Para o fechamento do sistema de equações, é utilizada uma equação que relaciona entalpia, pressão e temperatura, que é definida como equação constitutiva.

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT + \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{\rho} \left[ 1 + \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad (5.14)$$

Quando a massa específica é função da temperatura e pressão, a força de empuxo é calculada adicionando um termo fonte na equação da conservação da quantidade de movimento, sendo este termo função da variação da densidade local.

$$S_{M,empuxo} = (\rho - \rho_{ref}) g \quad (5.15a)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica do fluido no local em função da temperatura e da pressão;

$\rho_{ref}$  é a massa específica do fluido nas condições de referência e;

$g$  é a aceleração da gravidade.

Desta forma a massa específica é calculada em todos os nós para que se possa obter um resultado preciso. Quando o escoamento ocorre por pequenas variações de temperatura, acarretando pequenas variações de massa específica, é utilizada a aproximação de Boussinesq, no qual, segundo Maliska (1995), a massa específica é tratada como constante em todos os termos, com exceção do termo fonte, adicionado à equação da conservação de quantidade de movimento. Tal termo fonte é obtido através da equação (5.15b).

$$S_{M,empuxo} = (\rho - \rho') g \quad (5.15b)$$

Considerando então a massa específica do fluido como constante, a variação da massa específica local pode ser definida por:

$$\rho' = \rho \beta (T - T_{ref}) \quad (5.16)$$

Onde  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica do fluido,  $T_{ref}$  é a temperatura de referência e  $T$  é a temperatura calculada no local.

Para a solução precisa do problema em questão, seria necessária a modelagem do forno completo, com toda sua estrutura, incluindo a carga de material a ser queimado, peça por peça, a chaminé, além do canal que a liga até o forno. Entretanto pelas dimensões do conjunto, ficou constatado que não haveria a possibilidade de solucionar o problema como um todo, já que o forno possui 6 metros de diâmetro e a espessura das paredes das lajotas em seu interior é de um centímetro, que seria o menor valor da escala. Dessa forma, a malha necessária para representar esse material inviabiliza sua solução.

### 5.9 Passo de tempo

O passo de tempo é um parâmetro muito importante na simulação numérica. A escala de tempo determina a velocidade com que a solução do problema avança; desta forma, um passo de tempo mal definido faz com que a simulação demore muito tempo para convergir aos resultados ou até cause sua divergência.

Para o cálculo do passo de tempo são levados em consideração as dimensões do domínio, os parâmetros e dimensões das condições de contorno, o número de Mach e a força de campo do problema.

A determinação do passo de tempo é feita baseada nas escalas das grandezas envolvidas no problema, como dimensões, áreas, volumes, velocidades e pressões.

As escalas dimensionais usadas para calcular o passo de tempo são:

$$L_{cc} = \min \sqrt{A_{cc}} \quad (5.17)$$

$$L = \min(L_{vol}, L_{ext}) \quad (5.18)$$

$$L_{vol} = \sqrt[3]{V} \quad (5.19)$$

$$L_{ext} = \max(L_x, L_y, L_z) \quad (5.20)$$

Onde  $V$  é o volume do domínio,  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$ , são as dimensões do domínio nas três direções do plano cartesiano, e  $A_{cc}$  é a área de uma superfície de contorno permeável, por onde o fluido entra e sai do domínio.

As escalas de velocidade usadas para calcular o passo de tempo são:

$$U_{cc} = \max |\bar{U}_{cc}| \quad (5.21)$$

$$U_{no} = |\bar{U}_{no}| \quad (5.22)$$

$$U_{\Delta P} = \sqrt{\frac{p_{cc,max} - p_{cc,min}}{\bar{\rho}_{no}}} \quad (5.23)$$

Sendo  $\bar{U}_{cc}$  a velocidade média obtida nas superfícies de contorno,  $\bar{U}_{no}$  a velocidade média nos nós do domínio,  $p_{cc,max}$  e  $p_{cc,min}$  o maior e o menor valor de pressão obtido nas superfícies de contorno e  $\bar{\rho}_{no}$  a massa específica média nos nós do domínio.

Para escoamentos compressíveis, o número de Mach para a simulação é calculado através da equação (7.16).

$$M = \frac{\max(U_{cc}, U_{no}, U_{\Delta P})}{\bar{c}} \quad (5.24)$$

Onde,  $\bar{c}$  é a média aritmética da velocidade do som em todos os nós.

Assim, o passo de tempo é o menor entre os valores obtidos através das diversas escalas utilizadas.

$$\Delta t = \min(\Delta t_U, \Delta t_{\Delta P}, \Delta t_g, \Delta t_{rot}, \Delta t_c) \quad (5.25)$$

Onde,

$$\Delta t_U = 0,3 \frac{L}{\max(U_{cc}, U_{no})} \quad (5.26)$$

$$\Delta t_{\Delta P} = 0,3 \frac{L}{U_{\Delta P}} \quad (5.27)$$

$$\Delta t_g = \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (5.28)$$

$$\Delta t_{rot} = \frac{0,1}{\varpi} \quad (5.29)$$

Se  $M > 0,3$ , então,

$$\Delta t_c = 0,3 \frac{L}{\max(U_{cc}, U_{no}, U_{\Delta P}, \bar{c})} \quad (5.30)$$

### 5.10 Domínio de solução

Para contornar essa questão, o domínio de cálculo do problema foi reduzido ao interior do forno, excluindo a parede e a abóbada. Além disso, foi definido que todo o material a ser queimado, seria um meio poroso isotrópico. Tal artifício existente no CFX-5, reduz o número de pontos necessários para a solução deste problema. O mesmo tratamento seria dado ao piso do forno, comumente chamado de “crivo”. Além desta hipótese simplificativa, também foi adotada a simetria angular, restando como domínio apenas uma “fatia” do forno, representando um doze-avos do mesmo, apresentado na fig. 45.

O interior da fornalha foi mantido no domínio de solução, pois não se tem o conhecimento das condições que o fluido adentra a cavidade do forno.

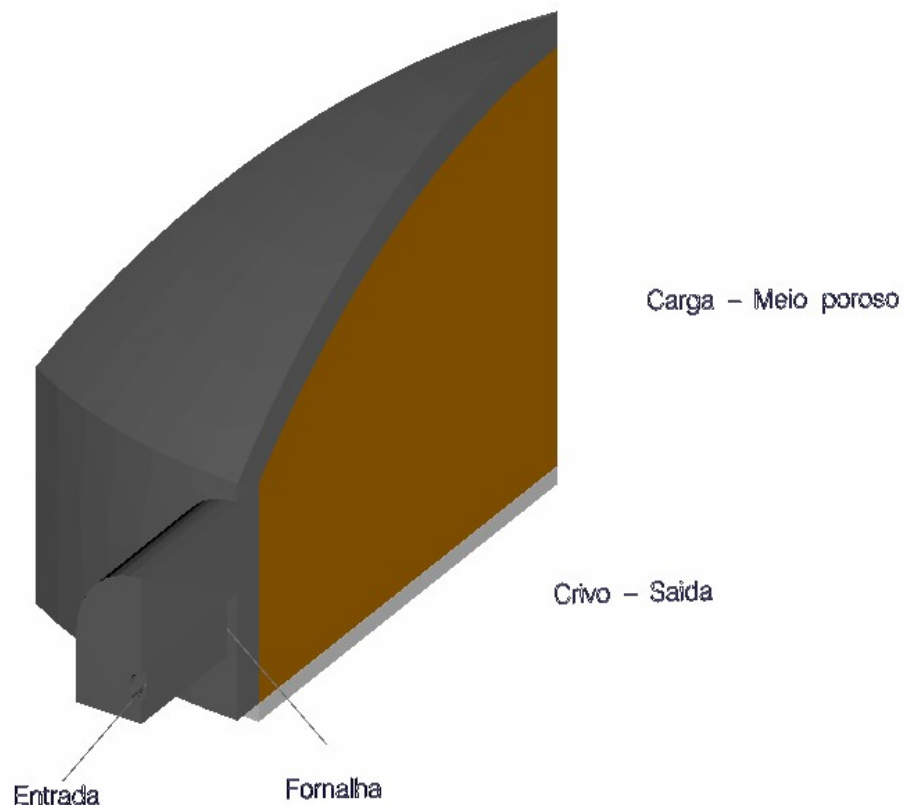


Figura 45 – Representação do domínio e subdomínios de solução.

### 5.11 Modelagem do meio poroso

Segundo Dybbs e Edwards, apud Kaviany (1995), a consideração de um meio poroso pode ser feita de acordo com o número de Reynolds, baseado na velocidade média no interior do poro e no diâmetro médio do poro. Sendo assim, foi calculado o número de Reynolds do escoamento no interior da carga de material a ser queimado:

$$Re = \frac{\overline{\rho u_p d_p}}{\mu} \quad (5.31)$$

Onde:

$\overline{u_p}$  é a velocidade média do escoamento no poro;

$\overline{d_p}$  é o diâmetro médio do poro;

$\rho$  é a massa específica do ar obtido na temperatura média do domínio;

$\mu$  é a viscosidade do ar obtido na temperatura média do domínio.

Assim:

$$Re = \frac{0,3.0,00315.0,02}{4,6.10^{-5}} = 0,41$$

Para  $Re < 1$  é utilizado o modelo de Darcy para escoamento em meios porosos. Em 1856, Darcy relacionou a perda de carga com a porosidade, viscosidade e a velocidade do escoamento, através da equação da conservação da quantidade de movimento de Darcy:

$$-\vec{\nabla} p = \frac{\mu}{\overline{\overline{K}}} \vec{u} \quad (5.21)$$

Onde  $\vec{\nabla} p$  é o vetor perda de carga,  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $\overline{\overline{K}}$  é o tensor permeabilidade e  $\vec{u}$ , o vetor velocidade.

Em um meio isotrópico, onde K é constante:

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\mu}{K} u_i \quad (5.22)$$

Assim, na componente z, pode-se aproximar por:

$$-\frac{\Delta p}{\Delta z} = \frac{\mu}{K} w \quad (5.23)$$

Logo,

$$\frac{\mu}{K} = -\frac{\Delta p}{\Delta z} \frac{1}{w} \quad (5.24)$$

Como a carga é colocada de forma repetitiva e ordenada no interior do forno, para a obtenção do parâmetro  $K$  foi utilizado o CFX, onde foi resolvida uma região da carga, apresentada na figura 46, que se repete por toda a sua extensão.

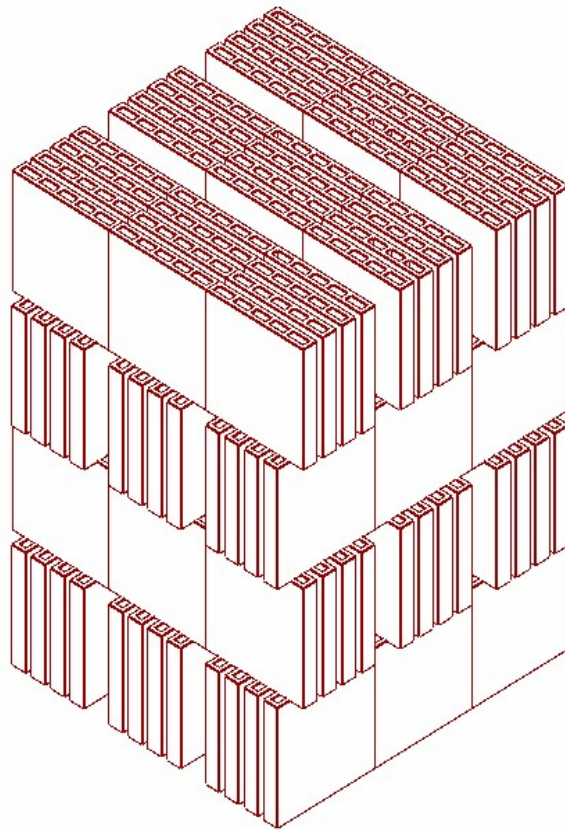


Figura 46 – Empilhamento da carga.

Apesar deste empilhamento da carga apresentar características ortotrópicas em sua porosidade, para simplificar o problema foi considerado um meio isotrópico.

### 5.12 Malha

Para a solução deste problema, e obtenção do tensor permeabilidade, foi gerada uma malha de 223.760 elementos hexaédricos. Devido à simplicidade da geometria do domínio de solução, foram utilizados elementos hexaédricos. Tais elementos são gerados a partir de sólidos paramétricos, que para serem construídos no próprio CFX 5 requerem uma geometria simplificada, formada apenas por cubos, cilindros e esferas.

### 5.13 Condição de contorno

Devido à disposição das peças e às características geométricas do forno, proporcionando um escoamento predominantemente vertical e descendente, considerou-se que apenas as fronteiras superiores e inferiores seriam permeáveis, desconsiderando o escoamento horizontal. Desta forma, foi determinada uma velocidade de entrada na

superfície inferior e condição de localmente parabólica na superfície inferior, bem como condição de parede nas laterais.

O resultado da simulação está apresentado na fig. 47 que apresenta o campo de pressão no plano xy, para dois valores de z conhecidos, bem como a pressão média em cada plano.

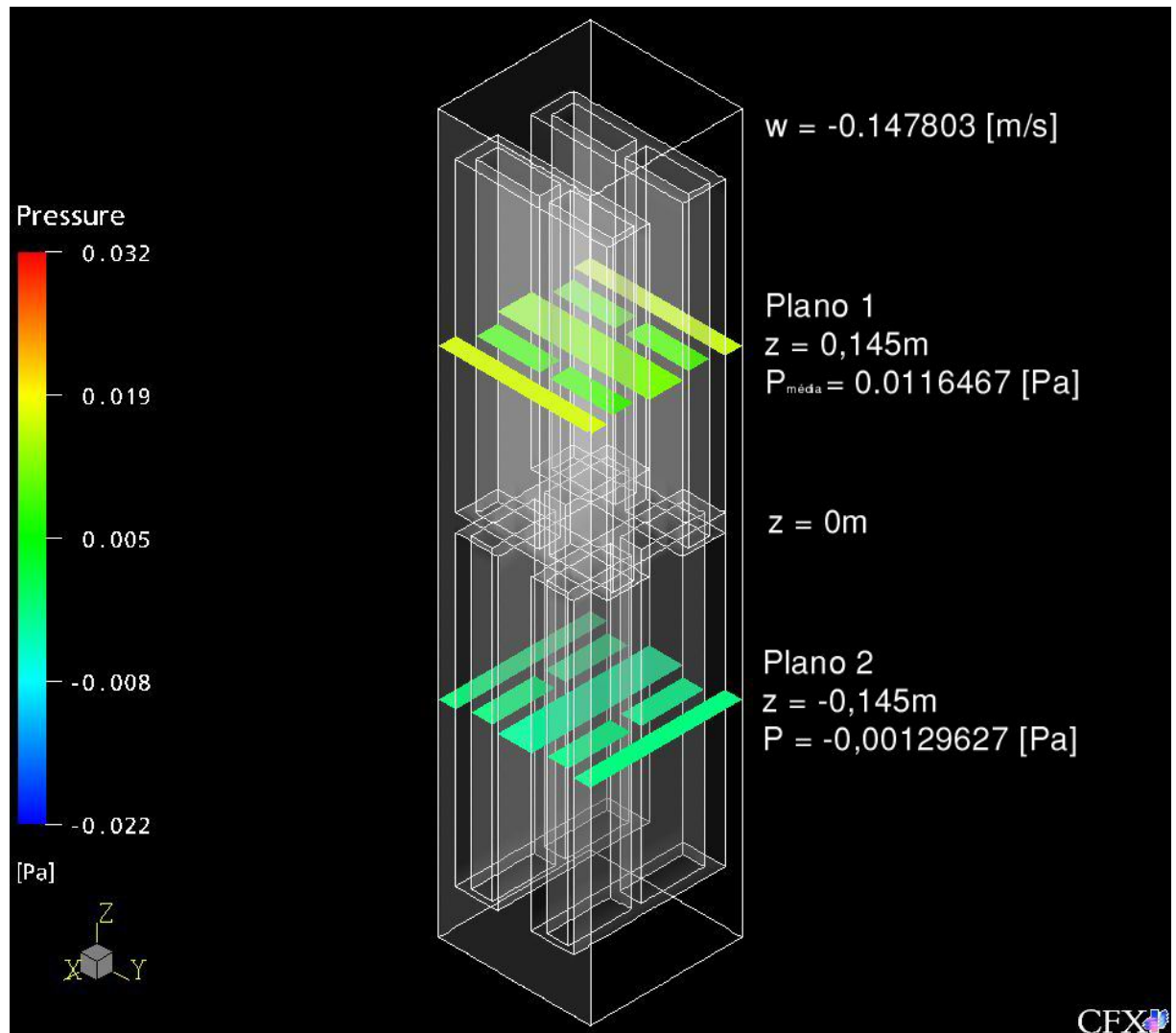


Figura 47 – Distribuição de pressão nos dois planos utilizados para o cálculo da razão.

A partir dos valores extraídos do CFX, é possível calcular a razão viscosidade/permeabilidade. Utilizando-se a equação (5.24):

$$\frac{\mu}{K} = -\frac{\Delta p}{\Delta z} \frac{1}{w}$$

Considerando a variação de pressão média entre os planos 1 e 2,  $\Delta z$  a distância entre os planos e  $w$  a velocidade do escoamento:

$$\Delta p = 0,0116467 - (-0,00129627) = 0,01294297 Pa$$

$$\Delta z = 0,145 - (-0,145) = 0,29 m$$

$$w = -0,147803 m/s - \text{constante devido à conservação da massa.}$$

Assim:

$$\frac{\mu}{K} = 0,302 \frac{Pa.s}{m^2}$$

### 5.14 Condições de contorno da simulação da “fatia” do forno

Para simplificação do problema não foi realizada a simulação da reação de queima do combustível, ou seja, os gases foram considerados como ar quente, ou mais precisamente como um gás ideal para a solução do problema. Como o fluxo de ar e a sua temperatura puderam ser medidos, pode-se determinar facilmente a condição de entrada do fluido no domínio. A condição de saída foi determinada como “openning”, e pressão constante, podendo entrar ou sair massa por essa superfície.

Como em todas as outras superfícies do domínio não há fluxo de massa atravessando-as, as mesmas foram definidas como paredes, sendo a condição de fluxo de calor calculada a partir das dimensões e propriedades dos elementos que constituem o forno. A sua parede possui 1 metro de espessura e é feita de tijolo comum com condutividade de 1,5 W/m.K, e sua abóbada possui cerca de 30 centímetros de camada de tijolo com a mesma condutividade, mais outra camada isolante de 20 centímetros de cinza de casca de arroz, com condutividade de 0,1 W/m.K, obtido experimentalmente no LMPT-EMC-UFSC. Foi considerado ainda o valor de 10 W/m<sup>2</sup>.K para o coeficiente de transferência de calor por convecção natural na superfície externa da parede.

Dessa maneira, através da equação (5.25), pode ser obtido um coeficiente de transferência de calor equivalente, considerando a condução na parede ou na abóbada e a convecção natural externa, sendo esse valor equivalente imposto à superfície do domínio.

$$\frac{1}{h_{eq}} = \left( \frac{1}{h} + \frac{L}{k} \right) \quad (5.25)$$

Para a superfície que representa a parede, o coeficiente obtido foi de 1,3 W/m<sup>2</sup>.K e para abóbada, foi de 0,4 W/m<sup>2</sup>.K.



### 5.15 Novo domínio de solução

Nas primeiras simulações com a “fatia” do domínio, permitida pela simetria, a solução do problema não foi possível pela falta do conhecimento da pressão logo após o piso do forno. Desta forma o domínio do problema teve que ser estendido até as regiões de onde se tinha conhecimento das condições de saída. Então o domínio passou a compreender, além do forno inteiro, a chaminé e o canal que os interliga.

A figura 48 mostra o domínio resolvido no CFX com a finalidade de se conhecer o comportamento dos gases no interior do forno. Como a geometria da fornalha influencia diretamente na movimentação dos gases, ela também foi incorporada ao domínio, fazendo com que o domínio abranja desde a saída dos queimadores até a saída da chaminé, as quais são condições facilmente pré-determinadas.

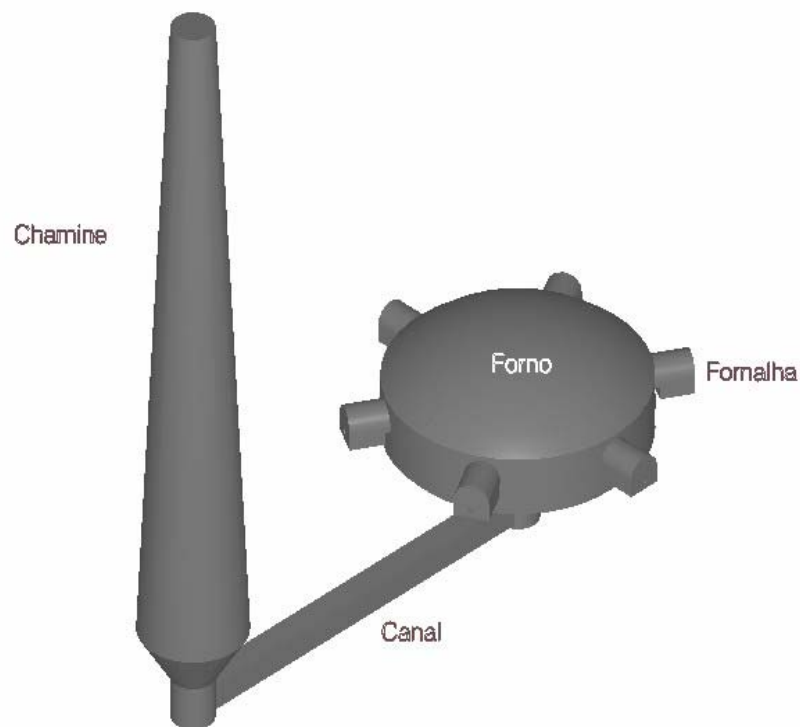


Figura 48 – Domínio de solução do problema completo.

A figura 49 ilustra o domínio em corte, com o intuito de mostrar os subdomínios definidos como meios porosos, onde será adicionado um termo fonte da quantidade de movimento, a partir da equação de Darcy, bem como um termo fonte na equação da energia, representando o gasto de energia térmica com o aquecimento do material.

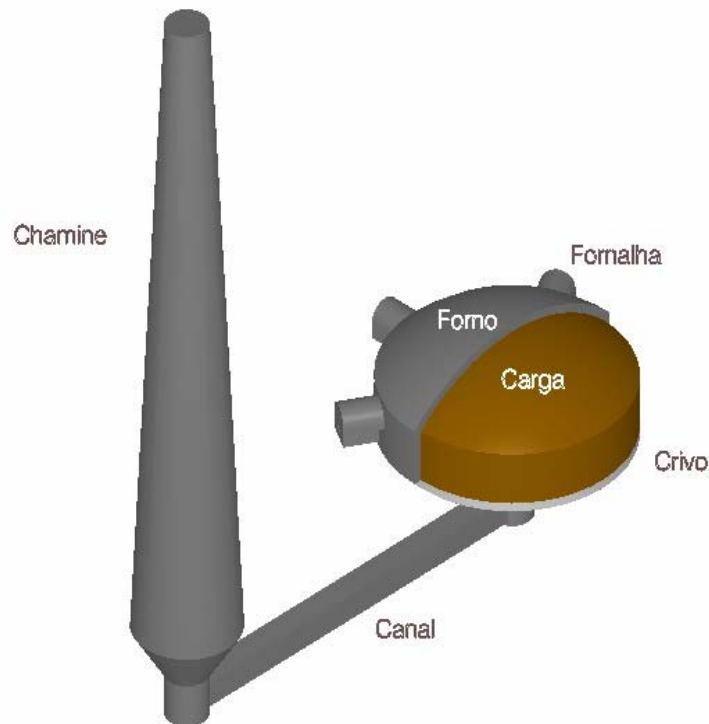


Figura 49 – Domínio de solução do problema completo – com a representação dos subdomínios.

### 5.16 Malha

Ao estender o domínio de soluções até a chaminé de exaustão, gerou-se uma malha de 1.221.600 elementos, em forma de tetraedros e prismas. O emprego de elementos tetraédricos para esta solução, se deve a complexidade da geometria do domínio. Para obter melhores resultados sobre o comportamento do escoamento nas paredes do forno, foram gerados elementos prismáticos. Tais elementos possibilitam que a segunda “fila” de nós possua a mesma distância dos primeiros nós que se encontram na fronteira do domínio.

### 5.17 Condição de contorno

As condições de contorno para a parede e para abóbada foram mantidas, porém a mudança das fronteiras do problema implicou na mudança de algumas condições de contorno. A condição de saída foi deslocada para a chaminé, onde são conhecidas as condições em que o fluido se encontra. Além disso, na parede da chaminé, foi considerada a mesma condição da parede, pela sua semelhança construtiva. Para as superfícies da

base e dos canais da base, as condições de contorno foram definidas como paredes adiabáticas.

### 5.18 Resultados assistidos por CFD

A validade do modelo que define a carga no interior do forno como um meio poroso, foi determinada pelo número de Reynolds igual 0,41 – inferior à 1. As figuras 50, 51 e 52 mostram os campos de temperatura, velocidade e os vetores velocidade, respectivamente, no plano yz, que corta o centro do forno.

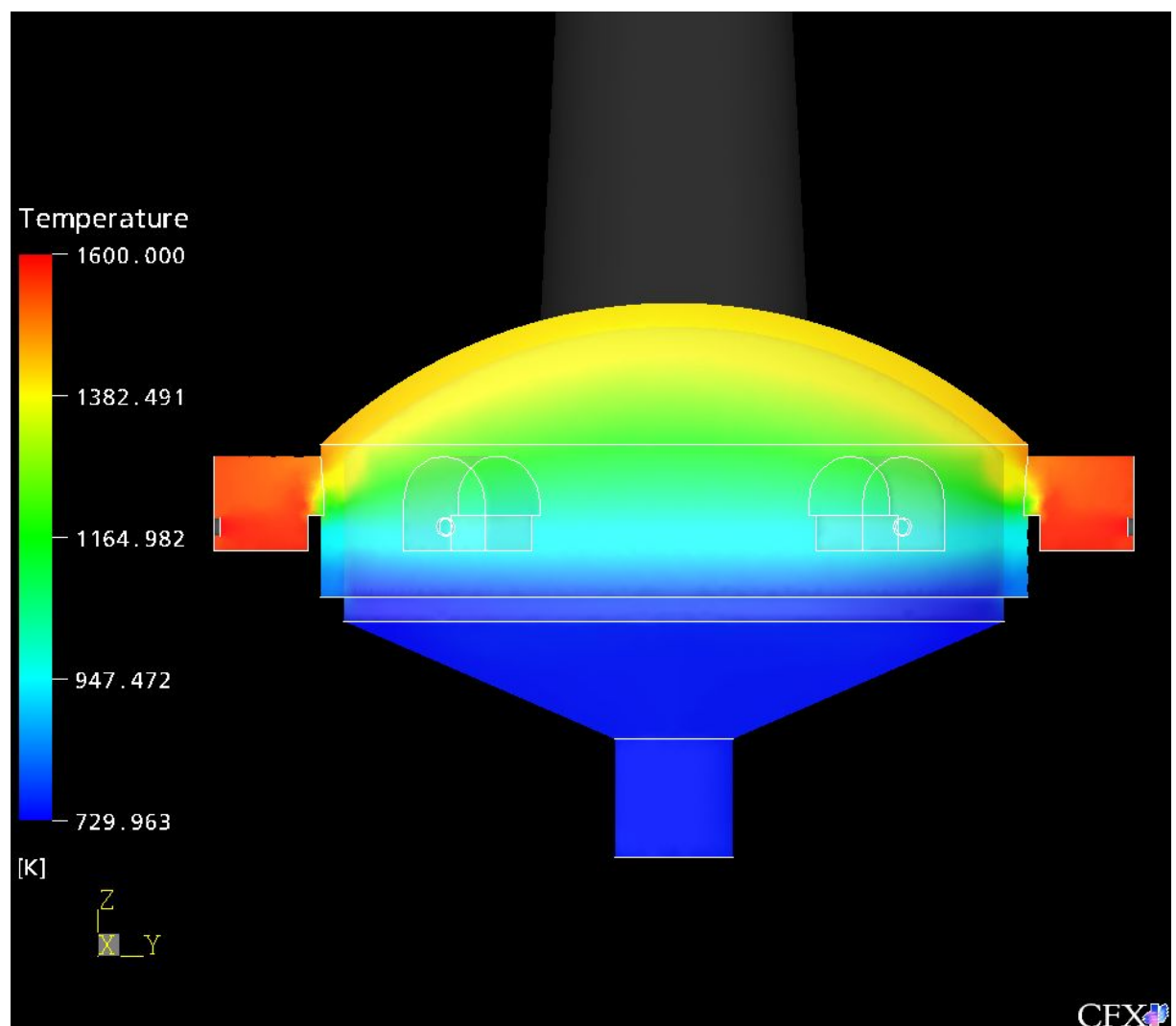


Figura 50 – Campo de temperatura.

O campo de temperatura, apresentado na figura 50, mostra um gradiente de temperatura negativo, à medida que os gases se distanciam da abóbada. Tal fato ocorre devido ao termo fonte de energia negativo, que consome energia dos gases circulantes à medida que estes gases se deslocam, encontrando uma região mais fria do que já haviam

passado. Assim, quanto maior o tempo de permanência da partícula no interior do forno, mais sua energia será consumida, baixando a sua temperatura.

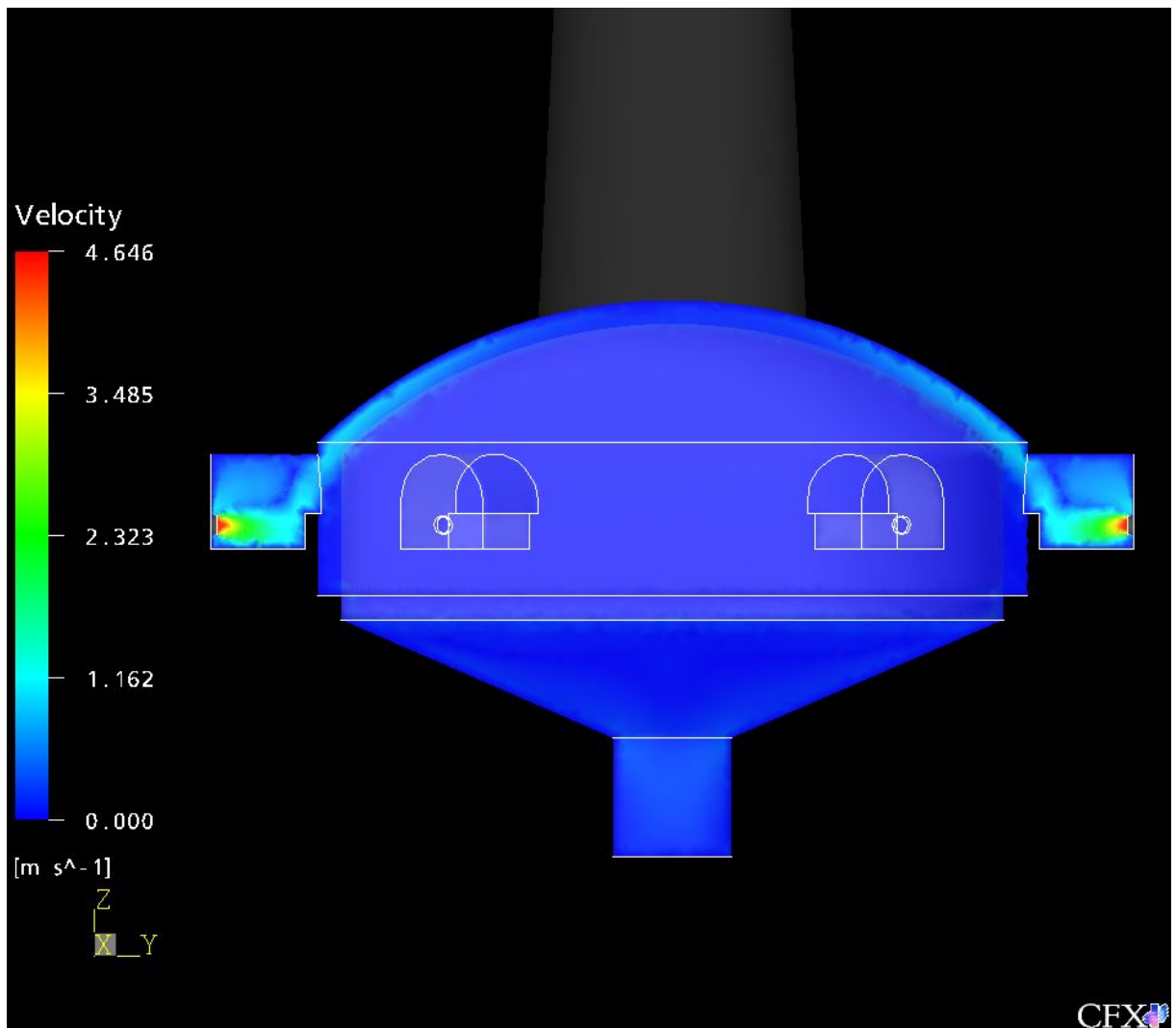


Figura 51 – Campo de velocidades.

Na figura 51, que ilustra o campo de velocidades, pode-se notar que o meio poroso representa uma resistência ao fluxo de gases, pois além de restringir sua entrada num primeiro instante, uniformiza o campo de velocidade em seu interior.

Analisando a figura 52, a posição, direção e sentido dos vetores, confirmam a expectativa sobre o comportamento do escoamento no interior do forno intermitente de chama invertida. Os gases quentes, injetados pelos queimadores nas fornalhas, dirigem-se à parte superior do forno, passando a um escoamento vertical para baixo, através do material da carga. Estes gases passam pelo crivo do forno, atingindo, em seguida, o canal ligado à chaminé.

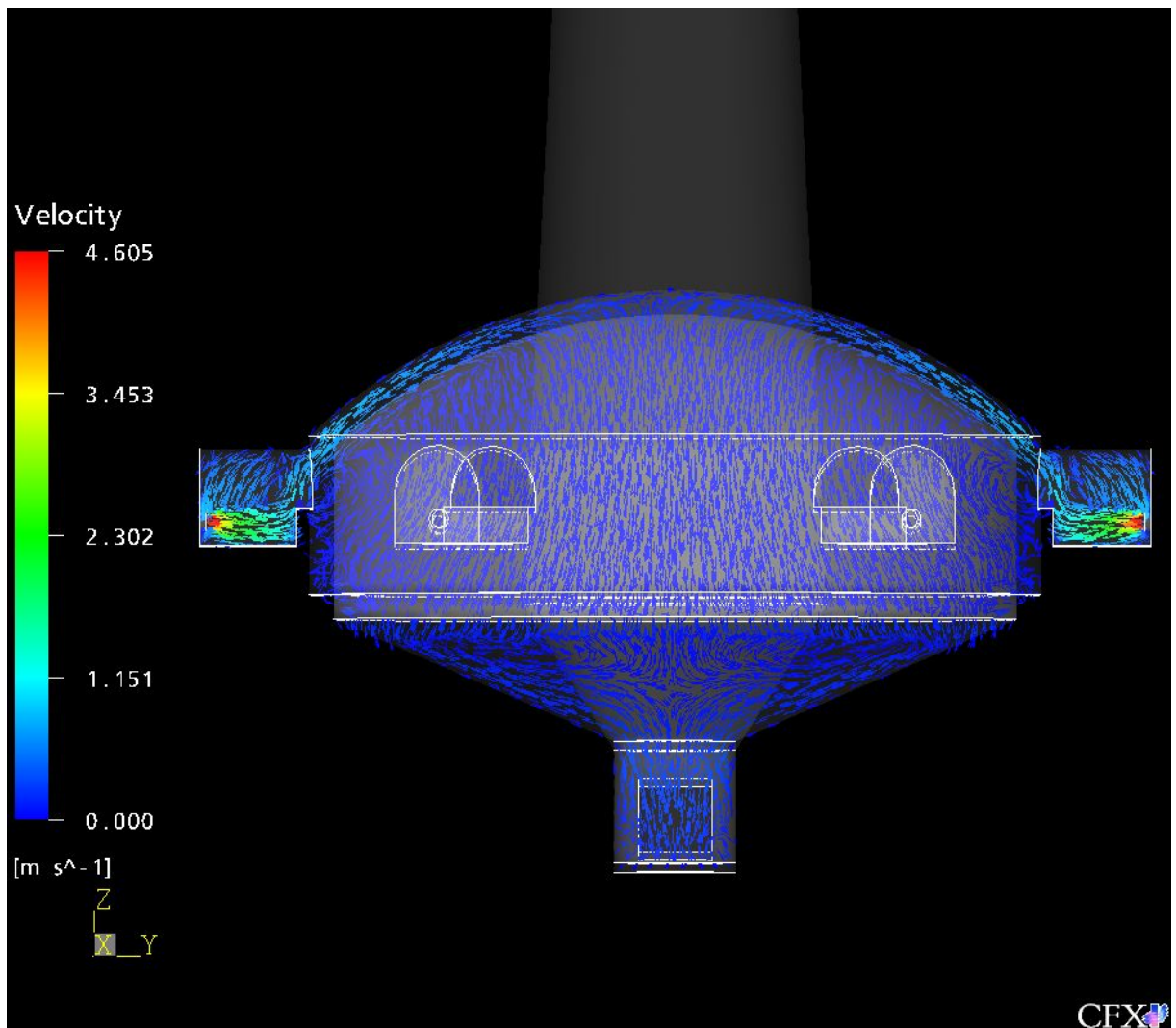


Figura 52 – Vetores de velocidade projetados no plano xz, que passa pelo centro do forno.

A geometria do canal adotada abaixo do piso do forno, com uma brusca variação no diâmetro da seção transversal do forno, acarreta a geração de fortes gradientes de pressão. Tal fenômeno gera regiões de turbulência, que se concentram na periferia do canal. Desta forma o fluido tende a escoar preferencialmente pelo centro do forno, fazendo com que haja disparidade nas condições finais do produto, refletindo diretamente em sua qualidade.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através do modelo matemático baseado em diferenças finitas, apresentaram boa concordância com a situação real, principalmente após a inclusão dos termos de reações presentes no processo. Os resultados das abordagens numérica e experimental, efetuadas sobre o forno em questão, mostram as potencialidades da ferramenta computacional, tanto no sentido de atingir uma redução no consumo energia, quanto no melhor conhecimento do processo de queima como um todo, buscando uma melhoria da qualidade.

O *SimFint* mostrou-se como uma ótima ferramenta de auxílio na conversão de fornos intermitentes, prevendo seu funcionamento com o outro combustível, além de identificar todos os mecanismos de perdas durante o processo de queima. Essas informações facilitam a escolha da melhor opção de investimento, proporcionando maior retorno.

Embora sejam fornos bastante rústicos, alguns melhoramentos podem ser facilmente aplicados e possuem baixo custo de implantação, como o isolamento da abóbada. A aplicação do isolamento na superfície externa da abóbada, da forma com que foi implantada durante o trabalho, implica apenas em uma redução das perdas para o ambiente, mas que representavam mais de 7% da energia consumida no processo. Sua aplicação na superfície interna proporcionaria, além da redução das perdas por convecção e radiação, uma redução no aquecimento da estrutura da abóbada. Porém a aplicação do isolamento na superfície interna requer um trabalho mais elaborado e custoso, diferente da adotada no trabalho que representou um custo muito baixo. Pela grande importância que representa a parcela de aquecimento da parede do forno, cerca de 8%, pode-se também pensar na colocação de um isolamento no local, sendo mais recomendável o uso de uma primeira camada de tijolos refratários, em função do ataque a um isolante fibroso exposto.

Tendo em vista a grande dificuldade de medições, o uso da tecnologia de CFD se mostrou como uma poderosa ferramenta no conhecimento do comportamento dos gases nesta aplicação, mesmo se tratando de um problema de grandes dimensões. Os resultados obtidos com o CFD mostraram a direção e sentido predominante do fluxo dos gases no interior do forno. Apesar de pouco representativa, a análise térmica mostrou o gradiente de temperatura existente neste tipo de fornos. A geometria complexa do forno em questão, aliada a suas dimensões, dificultaram a solução do problema, gerando uma malha com muitos elementos, com custo computacional elevado, requerendo tempo e investimento em equipamento. A equação de Darcy se mostrou como uma boa alternativa para a

simplificação do problema em questão, representando adequadamente o fenômeno físico e possibilitando a solução do problema sem a utilização de computadores especiais.

Os resultados apresentados pela ferramenta de CFD mostraram que o escoamento dos gases no interior do forno, tende a ocorrer pelo centro. Um escoamento irregular afeta diretamente a qualidade final do produto. Porém uma simples redistribuição dos furos no piso do forno, concentrando-os na periferia, reduziria o efeito de centralização do escoamento. Outra alternativa seria a redução da altura das fornalhas, as quais se encontram distantes do centro. Tal medida facilitaria a sucção pela periferia do piso, reduzindo a ação do empuxo sobre os gases quentes. Em contrapartida, reduziria o tempo de permanência do fluido no interior do forno, permitindo que se dirija à chaminé numa temperatura mais elevada, aumenta o desperdício de energia térmica.

Além de mudanças construtivas, é possível a introdução de mudanças operacionais, de implementação mais trabalhosa, porém mais eficientes. Para tal, a energia presente nos gases de combustão e no ar de resfriamento do forno, que consomem 28% da demanda total de energia, deve ser recuperada. Os gases quentes recuperados poderiam ser utilizados na secagem do material ou até para o aquecimento de uma outra “fornada”, já que no final do processo, os gases deixam o forno com temperatura superior a 800°C. Assim o processo tornar-se-ia semi-contínuo.

Com o objetivo de quantificar os benefícios da mudança da concepção do forno, foi realizada uma avaliação preliminar sobre o reaproveitamento dos gases de exaustão. Para os gases de exaustão serem reaproveitados, seria necessário direcioná-los ao interior de outro forno já preparado e carregado, fazendo com que os gases passem pelo interior deste forno antes de irem para a chaminé. A utilização é mostrada na figura 53. Desta forma os gases quentes trocam calor com o outro forno, promovendo um pré-aquecimento da próxima fornada. Para isto os fornos devem trabalhar seqüencialmente e em ciclos. Tal medida permitiria à próxima carga, antes de ser queimada, trocar calor com os gases quentes, por aproximadamente 20h antes do início da queima. Este tempo garantiria uma boa preparação da carga a ser queimada, elevando sua temperatura e atenuaria o gradiente de temperatura vertical. Desta forma um estudo mais aprofundado seria de grande valia, requerendo apenas algumas obras na empresa e o treinamento do pessoal, capacitando-os a trabalhar dentro de uma programação.

O uso do gás natural como combustível possibilitou uma redução no tempo do ciclo de queima do forno, porém acarretou um aumento no número de peças não glazuradas. Tal fato implicaria em uma pequena redução na receita da empresa, mas é facilmente compensado pela redução no consumo de energia e no aumento de produtividade.

A análise comparativa do tempo de aquecimento mostrou que quanto mais lento o processo, melhor a qualidade do produto, mas trata-se de um pequeno ganho com alto

custo energético. Desta forma seria interessante ainda avaliar outros parâmetros geométricos do forno, como a distribuição dos furos no crivo e a altura das fornalhas.

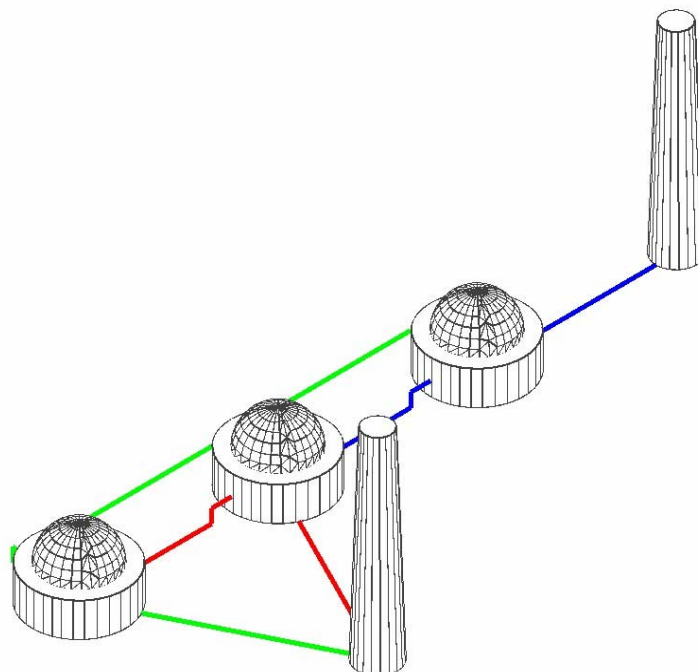


Figura 53 – Esquema ilustrativo para interligação dos fornos da Cerâmica Solar.

O sistema de queima do gás natural permite um maior controle de queima, além de facilitar a operação. A queima do óleo combustível só é possível após um prévio aquecimento do forno, feito com lenha. Esta limitação técnica obriga o operador a instalar os queimadores no decorrer do processo. Tal operação não é necessária utilizando o gás natural, pois é facilmente queimado à temperatura ambiente.

Apesar de apresentar uma série de vantagens, o alto custo do gás natural disponível em Santa Catarina, inviabiliza economicamente seu uso para a queima de lajotas. Seu uso é economicamente viável apenas para a fabricação de produtos com maior valor agregado.

Como conclusão geral demonstra-se que o forno intermitente representa um equipamento de elevado consumo específico de energia, que proporciona uma queima não uniforme. Como o nome indica, consiste em um elemento de descontinuidade na linha de produção da cerâmica, uma vez que cada queima pode ter a sua história particular.

Também a movimentação de carga útil, de combustível e de outros, acarreta dificuldades no interior da fábrica e maior custo de mão de obra. Uma vantagem do forno intermitente é que permite a realização do processo de glasura, impossível de ser realizado em um forno túnel. Face estas restrições, prevê-se o seu abandono pelas empresas mais desenvolvidas, permanecendo apenas nas empresas de menor porte.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC. **Anuário Brasileiro de Cerâmica**. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 1996.
- ABBAKUMOV, V. G. **Analyzing the heating and cooling of products in a high temperature tunnel kiln**. Refractories, v. 9, n. 2, p. 77-82, 1968.
- ABBAKUMOV, V. G., MOCIU, E. F. **Mathematical model, computation method and insurance of the temperature distributions in the firing zone of a tunnel kiln**. Refractories, n. 2, p. 19-25, 1981.
- BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, 216 p.
- BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. 2.ed. USA: John Wiley & Sons, 1995, 623 p.
- BORMAN, Gary L., RAGLAND, Kenneth W. **Combustion engineering**. USA: WCB/McGraw-Hill, 1998, 613 p.
- BRANCANTE, E. F. **O Brasil e a cerâmica antiga**. São Paulo, 1981.
- BRANCANTE, F.D. **A cerâmica na vila de São Paulo: seu interesse histórico e sociológico**. Revista Cerâmica, São Paulo, 1983.
- BUSTAMANTE, G.M.; BRESSIANI, J.C. **A indústria cerâmica brasileira**. Cerâmica Industrial, v. 5, n.3, 31-36, 2000.
- CAMPANTE, H. e SEABRA, A. M. **Diagnóstico e Otimização de Operações e Processos: Parte I - Fornos Industriais**. Revista KERAMICA nº 251, págs 26-36 (Janeiro /Fevereiro de 2002).
- DADAM A. P., NICOLAU V. P., LEHMKUHL W. A., HARTKE R.F., KAWAGUTI W. M., JAHN T. G. **Uso do Gás Natural na Queima de Produtos de Cerâmica Vermelha**. In: 47º CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa, 2003.
- DUGWELL, D. R., OAKLEY, D. E. **A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories**. International Journal Heat Mass Transfer, v. 31, n. 11, p. 2381-2390, 1988.
- FACINCANI, Ezio. **Tecnologia ceramica: i laterizi**. 2. ed. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.
- GARDIEK, H. O., SCHOLZ, R. **Thermal technology for tunnel kiln firing in the ceramic industry**. Interceram, v. 30, p. 4-6, 1981.
- GUIMARÃES, J.E.P. **Epítome da história da mineração**. Art Editora/ Secretaria de Estado da Cultura, São Paulo, 1981.

- HENRIQUES JR., M. F. et al. **Manual de conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha**. Ministério de Ciência e Tecnologia/INT, 1993.
- INCROPERA, Frank P., DE WITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992, 455 p.
- JAHN, T. G., DADAM, A. P. e NICOLAU, V. P., **Influência da temperatura e velocidade de queima nas propriedades de tijolos comuns**. In: 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2002, São Paulo. 14 p.
- JAHN T. G., NICOLAU V. P., HARTKE R. F., KAWAGUTI W. M., LEHMKUHL W. A., DADAM A. P. **Conversão para o Gás Natural de um Forno Túnel Destinado à Cerâmica Vermelha**. In: II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 2003.
- JUSTO, José Luis Argiz. **Avaliação da distribuição de temperatura em forno cerâmico utilizando o método dos volumes finitos**. Dissertação de Mestrado. Natal: UFRN/POSMEC, 1999.
- KAWAGUTI W. M., NICOLAU V. P., HARTKE R. F., JAHN T. G., LEHMKUHL W. A., DADAM A. P. **Análise numérica e experimental de um forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos**. In: II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 2003.
- KAVIANY, Massoud. **Principles of heat transfer in porous media**. Second edition, Springer-Verlag, New York, 1999.
- KUO, Kenneth Kuan-yun. **Principles of combustion**. USA: John Wiley & Sons, 1986, 810 p.
- MAFRA, Antero Tadeu. **Proposta de indicadores de desempenho para a indústria de cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 1999.
- MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas**. 1. ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995, 424 p.
- MESSIAS, Laiete Soto. **Recuperação de gases quentes em fornos intermitentes: aplicação na indústria de cerâmica estrutural**. Cerâmica Industrial, v. 1, n. 2, p.31-37, mai.-jun. 1996.
- NERI, J. T. C. F., SILVA, A. V., Nunes W. L. P., **Comparação de imagem térmica de um forno intermitente (chama reversível) para cerâmica vermelha usando gás natural como combustível**. Disponível em: <www.gasnet.com.br>. Acesso em: 11/11/02.

- NERI, J. T. C. F., SILVA, W.P., SANTOS, Z.T.S. e MEDEIROS, G. G., **Conversão de fornos cerâmicos para gás natural – A experiência do CTGÁS no Rio Grande do Norte**. In: Rio Oil & Gás Conference, Rio de Janeiro, 2000.
- NICOLAU, V.P., HARTKE, R. F., JAHN, T. G., LEHMKUHL, W. A. **Análise numérica e experimental de forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos**. In: CONEM 2002 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa, 2002.
- NICOLAU, V. P., JAHN, T. G., HARTKE, R. F., LEHMKUHL, W. A., KAWAGUTI, W. M., SANTOS, G.M. **Análise energética de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha**. In: CBE 2002 – Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro, 2002.
- NICOLAU, V. P., HARTKE, R. F., LEHMKUHL, W. A., KAWAGUTI, W. M., JAHN, T. G., SANTOS, G.M. **Análise numérica e experimental de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha**. In: ENCIT 2002 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Caxambú, 2002.
- NICOLAU V. P., LEHMKUHL W. A., JAHN T. G., DADAM A. P., HARTKE R. F., KAWAGUTI W. M., **Análise Experimental de um Secador contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha**. In: CONEM 2004 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Belém, 2004.
- ROSA, Murilo. **Manual técnico para diagnóstico energético em indústrias de cerâmica vermelha**. Florianópolis: FIESC, 1999.
- REMMEY JR., G. B. **Firing ceramics**. Advanced series in ceramics, vol. 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1994.
- RESENDE, M. P., **A utilização da argila através dos tempos**. Revista Expressão nº 2, 2001.
- SANTOS, G. M., **Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, Brasil.
- SANTOS, G. M., BAZZO, E., NICOLAU, V. P., et al. **Serragem e gás natural como fontes energéticas em fornos túneis na indústria cerâmica vermelha**. In: ENCIT 2000 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Porto Alegre, 2000.
- SANTOS, Pérsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2.ed., v. 1. Edgard Blücher, 1989.
- SECTME. **Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina**. Florianópolis: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia de Santa Catarina, 1990.

- SENAI/CET TIJUCAS. **Curso de tecnologia em cerâmica vermelha – Módulo: massa, secagem, queima.** SENAI/CET Tijucas, 1996.
- SENAI/CNI. **Estudo sobre a utilização do gás natural na indústria cerâmica.** Rio de Janeiro: SENAI/CNI, 1997.
- TAPIA, R. E. C., VILLAR, S. C., HENRIQUE JR., M. F., et al. **Manual para a indústria de cerâmica vermelha.** Série uso eficiente de energia. Rio de Janeiro: SEBRAE, 2000, 90 p.
- WITTWER, E., FARIA, R. W. **PROJETO: Conservação de energia nas pequenas e médias indústrias do Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha.** Relatório final, Rio de Janeiro, 1997.
- XU, Zhongsheng. **Energy saving ways of the refractory industrial tunnel kilns.** Refractories, n. 3, p. 51-53, 1984.
- YU, Boming. **Dynamic modeling of a tunnel kiln.** Heat Transfer Engineering, v. 15, n. 2, p. 39-52, 1994.